

MARILAN PEDRO DUMKE

**CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE COM FIBRAS
DE CELULOSE, LIGANTE MODIFICADO POR
POLÍMERO E ASFALTO-BORRACHA**

Florianópolis, abril de 2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL - PPGEC

CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE COM FIBRAS DE CELULOSE, LIGANTE MODIFICADO POR POLÍMERO E ASFALTO-BORRACHA

Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.

MARILAN PEDRO DUMKE

Área de Concentração: Infra-Estrutura e Gerência Viária

Orientador: Prof. Dr. Leto Momm

Florianópolis, abril de 2005

DUMKE, Marilan Pedro.

CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE COM FIBRAS DE CELULOSE, LIGANTE MODIFICADO POR POLÍMERO E ASFALTO-BORRACHA. Florianópolis, SC, 2005, 111 p.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Leto Momm

Defesa: abril/2005

1. Concreto Asfáltico Drenante 2. Ligante Asfáltico Modificado 3. Asfalto-borracha 4. Polímero 5. Fibras de Celulose.

CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE COM FIBRAS DE CELULOSE, LIGANTE MODIFICADO POR POLÍMERO E ASFALTO-BORRACHA

MARILAN PEDRO DUMKE

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof^ª. Henriette Lebre La Rovere - Coordenadora do Curso

Prof. Dr. Leto Momm - Orientador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leto Momm - Moderador - UFSC

Prof. Dr. Glicério Trichês - UFSC

Prof. Dr. Antônio Fortunato Marcon - UFSC

Prof^ª. Dr^ª. Liedi Legi Bariani Bernucci - ESC. POLITÉCNICA/USP

Em 25 de abril de 2005.

*Os mestres podem abrir a porta,
mas só você pode entrar.*

(provérbio chinês)

*Dedico à minha família,
meus pais, Antenor e Zeni, pela vida e a educação;
minha irmã Marilu e meu cunhado Michel, por estarem sempre ao meu lado.
Obrigado pelo incentivo e ajuda em todos os momentos.
Amo vocês!*

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Leto Momm, mais que um orientador e professor foi também um grande amigo. Agradeço por sua orientação, por sua dedicação, compreensão e principalmente paciência em me auxiliar em todas as etapas deste trabalho. Muito obrigado!

Ao Professor Glicério Trichês, por ter me acolhido inicialmente no Mestrado, por sua orientação e compreensão, pelo auxílio e pelos seus ensinamentos.

À Professora Liedi Legi Bariani Bernucci, por haver colocado o Laboratório de Tecnologia de Pavimentação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (LPT/EPUSP) ao meu dispor. Minha gratidão ao laboratorista Edson de Moura e ao auxiliar Erasmo, apoios fundamentais na realização dos ensaios de deformação permanente.

Ao amigo Armando Morilha Jr. e à diretoria do Grupo Greca Asfaltos, por seus apoios. Agradecimentos também à José Antonio Antoszczem Jr., Wander Paulo da Silva Omena, Juraci Silva Cordeiro, Edson Olivir Zotto Andrade e Gilson Geraldo Jorge, pelo auxílio nos ensaios de laboratório com asfalto-borracha.

À Professora Henriette Lebre La Rovere e às secretárias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Marinéia Vieira de Almeida e Edna Colombo, das quais sempre me atenderam muito bem e pela ajuda prestada durante todo o curso.

Aos meus tios, Arlindo Jacó Goedert e Teresinha Simas Goedert e aos primos Carlos Ricardo Goedert, Cássio Rafael Goedert, Cíntia Lais Goedert e Gustavo Jacó Goedert, por me acolherem em diversos momentos, por toda ajuda e apoio.

Aos amigos Fábio Cardoso de Matos e Marcelo Henrique Sarmento Silva, pelo companheirismo e auxílio na realização dos ensaios de laboratório na etapa final deste trabalho.

À Rubens Schramm, do DEINFRA, por sua atenção e ajuda no entendimento da execução dos ensaios Marshall em laboratório, bem como ao estudante de engenharia Ruben F. Esteche Pedrozo, bolsista do PIBIC/CNPq/UFSC, que também ajudou na execução de alguns ensaios.

Agradecimentos à Eduardo Samara, Rômulo Constantino, Leandro Aguiar Liberatori e Osvaldo Tuchumantel Júnior, por toda colaboração, atenção e apoio.

Meu reconhecimento a todos os colegas de curso, pela convivência agradável e pelo incentivo durante boa parte do Mestrado, em especial: Juliana Cavalcanti (in memoriam), Paulo Sérgio Peterlini, Maurício Luiz de Oliveira Franco, Alexandre José da Silva, Michele Wholmeister, Kleber Vieira, Francisco Caron Malucelli, Cláudia Moreira Dal Pai, Breno Salgado Barra, Paulo Marcos Tesser, Rodrigo Menegaz Muller, Marcos Antônio Fritzen, Rafael Mores, Rosemeri Michael e Diogo Schreiner Zanneti.

Um grande abraço no coração de todos.

Paz e Bem!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE ABREVIACÕES

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVO DO TRABALHO.....	2
1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO.....	2
1.3. IMPORTÂNCIA DO TEMA.....	4
1.4. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	4
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
 CAPÍTULO 2 - CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES.....	 6
2.1. PRINCÍPIOS GERAIS DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES.	7
2.1.1. Permeabilidade dos concretos asfálticos drenantes.....	9
2.1.2. Aderência nos concretos asfálticos drenantes.....	17
2.1.3. Textura dos pavimentos.....	18
2.1.4. Escoamento da água sobre os pavimentos.....	20
2.2. CURVAS GRANULOMÉTRICAS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	23
2.3. AGREGADOS PARA MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	26
2.4. LIGANTES ASFÁLTICOS UTILIZADOS NAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	27

2.5. PROJETO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES.....	30
2.5.1. Desagregação.....	30
2.5.2. Deformação permanente.....	31
2.6. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE.....	32
2.7. CLASSIFICAÇÃO DO CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE QUANTO AO NÚMERO DE CAMADAS.....	33
2.7.1. Concreto asfáltico drenante em uma camada de superfície.....	34
2.7.2. Camada de base.....	35
2.7.3. Camadas de superfície em duas camadas drenantes.....	35
2.8. INTERVENÇÕES PARA MANTER AS QUALIDADES DRENANTES.....	36
2.9. INTERVENÇÕES PARA REPAROS.....	38
2.10. DURABILIDADE DO CONCRETO ASFÁLTICO DRENANTE.....	38
2.11. EFEITO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE MODIFICADO POR POLÍMEROS EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	39
2.12. EFEITO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE MODIFICADO POR BORRACHA MOÍDA DE PNEUS EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	41
2.13. EFEITO DAS PROPRIEDADES DO LIGANTE INCORPORANDO FIBRAS DE CELULOSE EM MISTURAS ASFÁLTICAS.....	43
2.14. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
 CAPÍTULO 3 - MATERIAIS EMPREGADOS.....	 45
3.1. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS NA PESQUISA..	45
3.1.1. Agregados.....	46
3.1.2. Ligantes Asfálticos.....	47
3.1.3. Descrição dos Modificadores Utilizados.....	50
3.1.4. Polímeros.....	50
3.1.5. Asfalto-borracha.....	51

3.1.6. Fibras de Celulose.....	52
3.1.7. Cal.....	53
3.2. DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	53

CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO E RESULTADOS OBTIDOS..... 56

4.1. MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	58
4.2. ENSAIOS REALIZADOS.....	59
4.2.1. Ensaio de Percentagem de Vazios.....	59
4.2.2. Ensaio de Percentagem de Vazios Comunicantes.....	60
4.2.3. Ensaio de Permeabilidade nos Corpos-de-prova Marshall.....	62
4.2.4. Ensaio Cântabro.....	63
4.2.5. Ensaio de Estabilidade e Fluência Marshall.....	63
4.2.6. Ensaio de Tração Indireta por Compressão Diametral.....	65
4.2.7. Resultados dos Ensaios.....	65
4.2.8. Compactação das Placas.....	72
4.2.9. Ensaio de Permeabilidade das Placas.....	74
4.2.10. Ensaio de Deformação Permanente das Placas.....	79

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS..... 82

5.1. PERCENTAGEM DE VAZIOS.....	83
5.2. PERCENTAGEM DE VAZIOS COMUNICANTES.....	84
5.3. PERMEABILIDADE NOS CORPOS-DE-PROVA MARSHALL.....	86
5.4. DESGASTE CÂNTABRO.....	88
5.5. ESTABILIDADE E FLUÊNCIA MARSHALL.....	91
5.6. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO INDIRETA.....	94
5.7. PERMEABILIDADE NAS PLACAS.....	97
5.8. DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	98

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	101
6.1. AGENTES MODIFICADORES.....	101
6.2. TEORES DE LIGANTES.....	101
6.3. GRANULOMETRIA.....	102
6.4. RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES.....	102
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Esquema dos ensaios para as misturas de concreto asfáltico drenante estudadas.....	3
FIGURA 2.1	Detalhe da superfície de um revestimento de concreto asfáltico convencional e drenante.....	9
FIGURA 2.2	Aspectos dos tipos de vazios em seção de um revestimento drenante.....	10
FIGURA 2.3	Escoamento da água da chuva nos revestimentos impermeáveis.	10
FIGURA 2.4	Drenagem sobre um revestimento impermeável molhado.....	11
FIGURA 2.5	Infiltração e percolação em revestimento drenante.....	12
FIGURA 2.6	Drenagem e infiltração em revestimento molhado.....	12
FIGURA 2.7	Esquema do permeâmetro de carga variável, de campo.....	15
FIGURA 2.8	Esquema do permeâmetro de carga constante.....	16
FIGURA 2.9	Zonas de contato pneu-pavimento.....	21
FIGURA 2.10	Diferença entre um revestimento de concreto asfáltico drenante e um revestimento denso quanto ao efeito e formação da névoa atrás dos veículos.....	23
FIGURA 2.11	Esquema do conjunto de ensaios de MEURER FILHO (2001).....	24
FIGURA 2.12	Granulometria do conjunto de ensaios de MEURER FILHO (2001).....	25
FIGURA 2.13	Curva granulometria do conjunto de ensaios de MEURER FILHO (2001).....	25
FIGURA 2.14	Evolução da colmatção entre pavimentos tratados com limpeza e não tratados.....	37
FIGURA 3.1	Materiais selecionados (agregados e cal) para os ensaios.....	45
FIGURA 3.2	Viscosidade Saybolt Furol do CAP-50/60 e CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2.....	49
FIGURA 3.3	Polímeros Eastman EE-2.....	50
FIGURA 3.4	Fibras de celulose.....	52
FIGURA 3.5	Curva granulométrica G1 ($D_{m\acute{a}x}=9,50mm$).....	54
FIGURA 3.6	Curva granulométrica G2 ($D_{m\acute{a}x}=12,50mm$).....	55

FIGURA 4.1	Corpos-de-prova Marshall confeccionados para um tipo de mistura ensaiada.....	59
FIGURA 4.2	Moldagem dos corpos-de-prova para determinação do índice de vazios comunicantes.....	61
FIGURA 4.3	Ensaio de permeabilidade nos corpos-de-prova Marshall.....	62
FIGURA 4.4	Equipamento usado para a realização do ensaio de estabilidade e fluência Marshall.....	64
FIGURA 4.5	Procedimentos para a confecção das placas.....	72
FIGURA 4.6	Molde com a placa compactada.....	73
FIGURA 4.7	Compactador LPC do LTP/EPUSP para moldagem das placas...	73
FIGURA 4.8	Detalhe da compactação com chapa metálica.....	74
FIGURA 4.9	Drenômetro e equipamentos utilizados.....	75
FIGURA 4.10	Corte longitudinal do drenômetro	76
FIGURA 4.11	Vista superior do drenômetro.....	76
FIGURA 4.12	Vista superior da argola de chumbo.....	77
FIGURA 4.13	Corte longitudinal da rolha de cortiça.....	77
FIGURA 4.14	Ensaio de permeabilidade nas placas.....	78
FIGURA 4.15	Esquema dos pontos para análise da permeabilidade.....	78
FIGURA 4.16	Equipamento de simulação de tráfego (deformação permanente).....	79
FIGURA 4.17	Esquema dos pontos para leitura das deformações.....	80
FIGURA 4.18	Dispositivo de medida das deformações nas placas.....	80
FIGURA 5.1	Percentagem de vazios - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	83
FIGURA 5.2	Percentagem de vazios - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$)....	84
FIGURA 5.3	Percentagem de vazios comunicantes - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	85
FIGURA 5.4	Percentagem de vazios comunicantes - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).....	85
FIGURA 5.5	Permeabilidade - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	87
FIGURA 5.6	Permeabilidade - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).....	87
FIGURA 5.7	Cântabro (seco à 25°C) - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	89
FIGURA 5.8	Cântabro (seco à 25°C) - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$)....	89
FIGURA 5.9	Cântabro (úmido à 60°C) - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$)...	90

FIGURA 5.10	Cântabro (úmido à 60°C) - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).	90
FIGURA 5.11	Estabilidade Marshall - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	92
FIGURA 5.12	Estabilidade Marshall - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).....	92
FIGURA 5.13	Fluência Marshall - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	93
FIGURA 5.14	Fluência Marshall - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).....	93
FIGURA 5.15	Tração Indireta (seco à 25°C) - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	95
FIGURA 5.16	Tração Indireta (seco à 25°C) - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).....	95
FIGURA 5.17	Tração Indireta (úmido à 60°C) - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).....	96
FIGURA 5.18	Tração Indireta (úmido à 60°C) - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).....	96
FIGURA 5.19	Permeabilidade nas placas.....	97
FIGURA 5.20	Deformação permanente para $D_{máx}=9,50\text{mm}$ (brecha 0/4) para espessura da placa de 5,0cm na segunda etapa do trabalho de MEURER FILHO (2001).....	99
FIGURA 5.21	Deformação permanente para $D_{máx}=12,50\text{mm}$ (brecha 0/6) para espessura da placa de 5,0cm na segunda etapa do trabalho de MEURER FILHO (2001).....	99
FIGURA 5.22	Deformação permanente para $D_{máx}=19,10\text{mm}$ (brecha 0/9) para espessura da placa de 5,0cm na segunda etapa do trabalho de MEURER FILHO (2001).....	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1	Principais tipos de ligantes utilizados em países da Europa para concretos asfálticos drenantes.....	29
TABELA 2.2	Especificações exigidas conforme norma brasileira DNER-ES 386/99 (1999).....	30
TABELA 3.1	Densidade real dos granulares.....	47
TABELA 3.2	Características do ligante asfáltico CAP-50/60 utilizado.....	48
TABELA 3.3	Viscosidade Saybolt Furol do CAP-50/60 e CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2.....	48
TABELA 3.4	Características do ligante asfáltico CAP-20 puro e asfalto-borracha.....	49
TABELA 3.5	Características técnicas dos polímeros Eastman EE-2.....	51
TABELA 3.6	Composição química da borracha moída de pneus.....	52
TABELA 3.7	Composição granulométrica passante da curva adotada para granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).....	54
TABELA 3.8	Composição granulométrica passante da curva adotada para granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).....	55
TABELA 4.1	Quantidade de corpos-de-prova moldes Marshall para os ensaios executados em função de cada umas das misturas estudadas.....	57
TABELA 4.2	Quantidade de placas moldadas com a granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).....	57
TABELA 4.3	Temperaturas para moldagem dos corpos-de-prova.....	58
TABELA 4.4	Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2 – Granulometria 1 – $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$	66
TABELA 4.5	Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2 – Granulometria 2 – $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$	67
TABELA 4.6	Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico de asfalto-borracha – Granulometria 1 – $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$	68

TABELA 4.7	Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico de asfalto-borracha – Granulometria 2 – $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$	69
TABELA 4.8	Resultado dos ensaios das misturas com fibras de celulose – Granulometria 1 – $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$	70
TABELA 4.9	Resultado dos ensaios das misturas com fibras de celulose – Granulometria 2 – $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$	71

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalisation
AIPCR	Association Internationale Permanente des Congress de la Route
BMP	Borracha moída de pneus
BRRC	Belgian Road Research Center
CAD	Concreto Asfáltico Drenante
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CAL	Coefficiente de atrito longitudinal
CAT	Coefficiente de atrito transversal
cP	Centi Poise
CP's	Corpos-de-prova
dB	Decibel
DER-SC	Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de Santa Catarina
DLL	Double Draining Layer
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
EPDM	Etileno-propileno-dieno
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EVA	Etileno-acetado de vinila
FAA	Federal Aviation Administration
FHWA	Federal Highway Administration
G1	Granulometria $D_{m\acute{a}x}=9,50\text{mm}$
G2	Granulometria $D_{m\acute{a}x}=12,50\text{mm}$
GNCSC	Group National Caractéristiques de Surface des Chaussées
LP	Laboratório de Pavimentação
LTP	Laboratório de Tecnologia de Pavimentação
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LPC	Laboratoire des Ponts et Chaussées
NF	Norme française
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
SBS	Estireno-butadieno-estireno
SBR	Estireno-butadieno-rubber
TRL	Transportation Research Laboratory
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{CP}	Área da face inferior ou superior do corpo-de-prova [cm ²]
A_p	Área do orifício inferior do permeâmetro [cm ²]
A_f	Área de fluxo [cm ²]
d	Densidade aparente da mistura
D_t	Densidade teórica máxima da mistura
$D_{máx}$	Diâmetro máximo do maior agregado utilizado na mistura [cm]
D_p	Densidade da parafina
FA	Força de atrito [N]
$h_{média}$	Média entre três medidas de altura do corpo-de-prova [cm]
$h_{reduzida}$	Altura reduzida [cm]
H_{tubo}	Distância entre dois meniscos [cm]
i	Gradiente hidráulico
K	Condutividade hidráulica [cm/h]
L	Volume de água entre os meniscos do cilindro [cm ³]
m_a	Massa da amostra ao ar [g]
m_i	Massa da amostra parafinada imersa em água [g]
m_p	Massa da amostra parafinada ao ar [g]
N	Força normal [N]
P	Diferença entre peso do corpo-de-prova cheio de água e seco [g]
P	Permeabilidade [cm/s]
P_i	Peso inicial do corpo-de-prova [g]
P_f	Peso final do corpo-de-prova [g]
P_p	Percentagem de perda do corpo-de-prova [%]
Q	Descarga [cm ³ /h]
$T_{percolação}$	Tempo de percolação da água [s]
T	Tempo [s]
V	Fluxo de escoamento d'água através do corpo-de-prova [cm/s]
vp	Velocidade de percolação [cm/s]
V_v	Volume de vazios [%]
V_{vc}	Percentagem de vazios comunicantes [%]
μ	Coefficiente de atrito
μ_a	Atrito molecular
μ_b	Atrito por histerese

RESUMO

O estudo avalia as características físicas e o comportamento mecânico em laboratório de concreto asfáltico drenante confeccionado com materiais granulares de mesma origem e granulometrias idênticas para variações de modificadores de ligantes e adição de fibras de celulose. Os concretos asfálticos drenantes obtidos com polímeros Eastman EE-2, com asfalto-borracha e adição de fibras de celulose são avaliados em seu comportamento quanto à percentagem de vazios e vazios comunicantes, permeabilidade, desagregação no ensaio Cântabro, estabilidade e fluência no ensaio Marshall, resistência à tração indireta e deformação permanente (simulador de trilha-de-roda).

Palavras-chave: concreto asfáltico drenante – ligante asfáltico modificado – polímeros – asfalto-borracha – fibras de celulose

ABSTRACT

The study evaluates the physical characteristics and the mechanical behavior in laboratory of pervious asphalt concrete confectioned with aggregates from one origin and identical granulating for variations of binders modifiers and addition of cellulose fibres. The pervious asphalt concrete obtained with polymers Eastman EE-2, with asphalt-rubber and addition of cellulose fibres are evaluated concerning the percentage of voids and communicating voids, permeability, loss in the *Cántabro* test, stability and flow of *Marshall* test, indirect tensile strength compression and rutting.

Key-words: pervious asphalt concrete – modified asphalt binder – asphalt-rubber – polymer – cellulose fibres

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

As misturas asfálticas drenantes como camadas de revestimento em pavimentos têm sido aplicadas de forma crescente em diversos países europeus, devido às vantagens oferecidas nos aspectos de segurança em pistas molhadas.

Esses concretos asfálticos drenantes possuem, como principal característica, uma composição granulométrica aberta, o que proporciona uma estrutura com elevado índice de vazios, permitindo a percolação das águas de chuva com grande eficiência. Com isso, reduz-se a possibilidade de ocorrência do fenômeno de hidroplanagem e, conseqüentemente, os riscos de acidentes de trânsito em dias chuvosos.

Além de melhorar as condições de segurança para os usuários das vias, os revestimentos de concretos asfálticos drenantes propiciam redução dos níveis de ruído externo ao veículo, provocados pelo tráfego, minimizando o impacto ambiental.

As pesquisas relacionadas às misturas de concretos asfálticos drenantes estão cada vez mais avançadas, no intuito de aliar a funcionalidade com a durabilidade das misturas. Através de estudos em laboratório, avaliam-se suas propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas.

A melhoria tecnológica dos veículos resultou em aumento das velocidades desenvolvidas pelos mesmos. Com isto, especialmente em condições climáticas desfavoráveis, impõe-se maior atenção das administrações rodoviárias ao estado da superfície das rodovias, principalmente naquelas de grande volume de tráfego, das quais são exigidos melhores padrões de segurança e de conforto em quaisquer condições de clima (AIPCR, 1991).

A aplicação desses revestimentos constitui-se num salto de qualidade, de conforto e de segurança considerável. Sendo que, para desenvolver um país, é necessário melhorar o padrão de qualidade de sua infra-estrutura rodoviária, pois não há país desenvolvido que não tenha um sistema rodoviário de qualidade.

Com o presente estudo, espera-se contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas para o âmbito da Engenharia Rodoviária, melhorando o conforto e a segurança de seus usuários.

1.1. Objetivo do trabalho

- Geral

O objetivo do trabalho é verificar o efeito da adição de fibras de celulose e da modificação por polímeros Eastman EE-2 e por borracha moída de pneus em misturas de concreto asfáltico drenante, otimizando sua principal função: a permeabilidade da mistura. No entanto, permanece o desafio de obter alta permeabilidade e manter os riscos de desagregação e deformação permanente nos limiares aceitáveis.

- Específico

O objetivo específico é avaliar a percentagem de vazios e vazios comunicantes, permeabilidade, estabilidade e fluência, resistência à tração indireta, desgaste quanto à desagregação e deformação permanente de misturas de concretos asfálticos drenantes confeccionados com fibras de celulose e ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2 e por borracha moída de pneus, sendo que esta avaliação é realizada somente por meio de análise laboratorial, sob mesmas condições e ensaios, para diferentes teores de ligante asfáltico. Verificando assim, qual dessas misturas apresenta melhores resultados.

1.2. Procedimentos para alcançar o objetivo

A pesquisa consiste em caracterizar as propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas das misturas de concretos asfálticos drenantes estudadas, seguindo-se as seguintes etapas: preparar as misturas em corpos-de-prova com a compactação Marshall para determinar a percentagem de vazios e de vazios comunicantes, a permeabilidade, a desagregação, a resistência à tração por compressão diametral e a estabilidade e fluência. Preparar as placas padronizadas pelo compactador LPC do LTP/EPUSP para o ensaio de deformação permanente e também para medida da permeabilidade. O esquema a seguir (Figura 1.1) apresenta os procedimentos de ensaios de forma simplificada para alcançar os objetivos propostos.

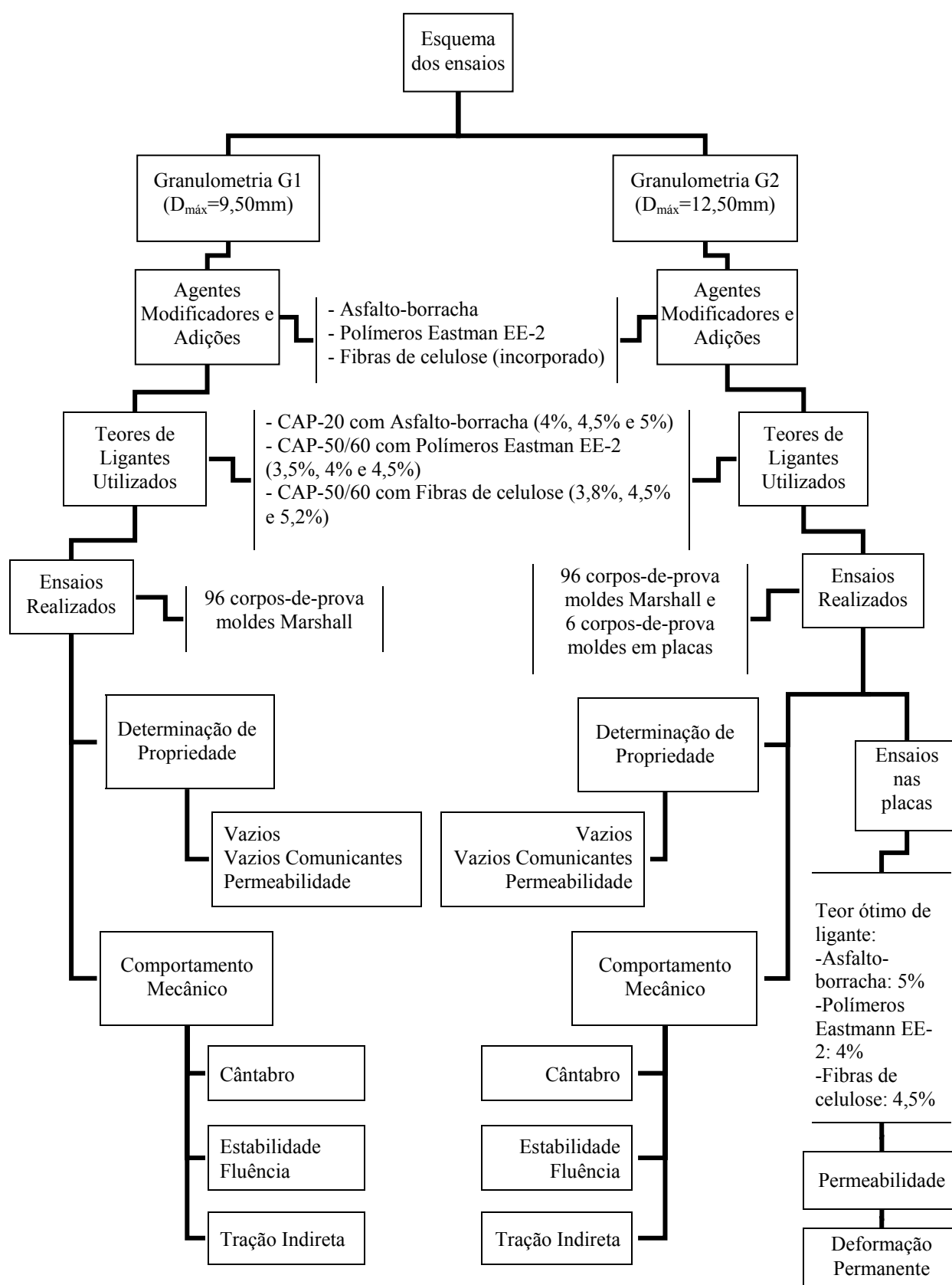


FIGURA 1.1 – Esquema dos ensaios para as misturas de concreto asfáltico drenante estudadas.

1.3. Importância do tema

Os concretos de asfalto drenantes são misturas que possibilitam o escoamento de água que venha a se acumular na sua superfície, drenando através de vazios existentes entre os grãos que formam sua estrutura.

A eficácia dessas misturas drenantes é avaliada em função da permeabilidade, deformação permanente e do desgaste, foco do estudo desse trabalho. A permeabilidade dos concretos asfálticos drenantes é função da granulometria, composta por agregados graúdos e materiais finos na formação do mástique.

É essencial que os concretos asfálticos drenantes possuam a maior percentagem de vazios comunicantes possível, para que a água possa percolar através da mistura. Por outro lado, uma grande percentagem de vazios do concreto asfáltico impõe que a curva granulométrica seja precisa. Com a aplicação de cimento asfáltico apropriado, reduzem-se os riscos de desagregação e de deformação permanente pela ação da repetição das solicitações nas trilhas-de-roda, permanecendo íntegro ao longo da vida de serviço.

A incorporação de polímeros, borracha moída de pneu e a adição de fibras de celulose aos ligantes asfálticos é uma tentativa de melhorar suas características físicas e reológicas, que se traduzem na melhoria de desempenho da mistura asfáltica em serviço, e melhorar o desempenho deste tipo de pavimento como camada de rolamento em rodovias.

1.4. Delimitação da pesquisa

A pesquisa limita-se aos ensaios em laboratório e ao concreto asfáltico drenante utilizando a composição granulométrica definida pelo estudo de MEURER FILHO (2001) e agregado granítico utilizado na confecção das misturas da região da Grande Florianópolis.

O trabalho está circunscrito quanto à utilização da adição de fibras de celulose, ligantes modificados por polímeros Eastman EE-2 e borracha moída de pneus nas misturas de concreto asfáltico drenante estudadas. Foram realizados ensaios com corpos-de-prova Marshall para a determinação das percentagens de vazios e de vazios comunicantes, permeabilidade, desgaste

Cântabro, tração indireta e estabilidade e fluência, bem como, ensaios realizados com placas moldadas no compactador LPC do LTP/EPUSP, para os ensaios de permeabilidade e deformação permanente.

1.5. Organização do trabalho

O trabalho é contribuído dos seguintes capítulos:

Capítulo 1: Introdução, expõe o assunto da pesquisa e a importância do tema, os objetivos e seus procedimentos para alcançá-los, suas delimitações e a organização da estrutura do trabalho.

Capítulo 2: Concretos Asfálticos Drenantes, abrange um estudo dos principais aspectos relacionados ao tema, considerações gerais sobre os concretos asfálticos drenantes e descreve os efeitos das propriedades do ligante modificado nas misturas estudadas.

Capítulo 3: Materiais Empregados, define a caracterização de todos os materiais utilizados na pesquisa, a composição granulométrica adotada e a descrição dos modificadores adicionados aos ligantes asfálticos para a confecção das misturas de concretos asfálticos drenantes estudados.

Capítulo 4: Procedimentos de Laboratório e Resultados Obtidos, estão descritos os procedimentos de preparação dos corpos-de-prova da pesquisa, os métodos de execução dos ensaios realizados e os resultados obtidos.

Capítulo 5: Análise dos Resultados, são apresentados e analisados os resultados obtidos dos ensaios de laboratório realizados.

Capítulo 6: Conclusões e Recomendações, tece as conclusões, recomendações e sugestões advindas deste trabalho de pesquisa.

CAPÍTULO 2 – CONCRETOS ASFÁLTICOS DRENANTES

A partir da década de 60 foram desenvolvidas misturas asfálticas com granulometria aberta, aplicadas, na sua maioria, sobre uma camada asfáltica existente. Com um elevado índice de vazios proporcionados pela granulometria aberta dos agregados, estas misturas propiciam a drenagem das águas pelos vazios comunicantes, eliminando a lâmina de água existente na superfície. Além desta propriedade, as misturas oferecem, ainda, uma redução dos ruídos provenientes da rolagem dos pneus sobre o pavimento devido à penetração do ar comprimido pelos pneus no interior dos vazios da misturas.

Na Europa e nos Estados Unidos, desde a década de 70, misturas de concretos asfálticos drenantes são utilizadas não só em rodovias, como também em aeroportos. Essas misturas foram especialmente desenvolvidas para permitir a passagem da água pluvial através do seu interior, provocando a mudança do conceito tradicional de impermeabilização da superfície externa de um pavimento e transferindo essa função para uma camada inferior à da superfície.

Misturas de concretos asfálticos drenantes vêm sendo amplamente aplicadas como camada de revestimento de pavimentos em diversos países: Bélgica (HEYSTRAETEN e MORAUX, 1990), Espanha (RUIZ *et al.*, 1990) e Suíça (ISENRING *et al.*, 1990), além de França, Estados Unidos e Japão estão evoluídos no que diz respeito à tecnologia de aplicação destes tipos de misturas.

Nas primeiras especificações americanas, a faixa granulométrica estabelecida era a mesma do tratamento superficial e a usinagem da mistura asfáltica possibilitava melhor envolvimento dos agregados. Em 1970, tanto a FHWA (*Federal Highway Administration*) como a FAA (*Federal Aviation Administration*) já apresentavam prescrições técnicas para a sua utilização em rodovias e aeroportos.

Nesta época, vários países da Europa, bem como o Japão e a África do Sul também começaram a fazer experimentos com misturas drenantes. Construíram nas décadas de setenta e de oitenta, os primeiros trechos experimentais, com uma espessura aproximada de 4cm, capaz de absorver boa parte da água superficial e evacuá-la para fora da pista. Em particular, as pesquisas inglesas, holandesas, francesas e belgas para as misturas drenantes evoluem e em poucos anos toma forma uma técnica européia que se supõe uma revolução conceitual na tecnologia de revestimentos.

A Espanha, entre 1979 e 1980, construiu quatro trechos experimentais em uma rodovia com tráfego pesado (KRAEMER, 1997). Na Bélgica, a primeira aplicação também ocorreu em 1979, como parte de uma pesquisa conduzida pelo BRRC (*Belgian Road Research Center*) e que consistia de um pequeno trecho com 2.700m², de uma rodovia em duas pistas com volume de tráfego diário de 700 veículos/dia em cada direção (HEYSTRAETEN e MORAUX, 1990).

O concreto asfáltico drenante é uma técnica de gerência aplicável para águas de chuvas, que pode ser usada em estacionamentos, vias expressas de baixo volume e vias urbanas (MALYSZ *et al.*, 2003).

Os revestimentos asfálticos drenantes possuem um elevado índice de vazios, que os torna permeáveis às águas de chuva e, como consequência, elimina a lâmina d'água sobre a superfície. E, ainda, apresentam boa capacidade de redução de reflexão da luz dos faróis e dos ruídos provenientes do tráfego de veículos, reduzindo o impacto ambiental na vizinhança das rodovias de vias urbanas.

Na dosagem deste tipo de mistura busca-se o teor de asfalto mínimo que assegure a resistência à desagregação de partículas da mistura e à deformação permanente, alcançando o máximo de permeabilidade possível, obtidas mediante o uso de agregados com granulometria especial e dosagem adequada de ligante.

Esses revestimentos drenantes apresentaram uma grande evolução desde as primeiras pistas experimentais e hoje fazem parte do esforço para melhorar as características superficiais dos pavimentos, objetivando oferecer pistas mais seguras e com maior conforto aos seus usuários.

2.1. Princípios Gerais dos Concretos Asfálticos Drenantes

Os concretos asfálticos drenantes são misturas asfálticas caracterizadas pelo elevado volume de vazios, obtidos por meio de uma dosagem adequada de agregados britados, fíler e cimentos asfálticos puros ou modificados por polímeros. Os vazios da mistura permitem a percolação da água proveniente da chuva, resultando em uma camada dita drenante ou permeável.

O concreto asfáltico drenante é uma mistura asfáltica que na sua composição apresenta mais de 20% de vazios após o espalhamento e a compactação. Esses concretos asfálticos são preparados a partir de granulares minerais e cimentos asfálticos puros ou modificados e eventualmente com melhoradores de adesividade e/ou aditivos minerais ou orgânicos. São misturas dosadas, aquecidas e misturadas em centrais de usinagem, transportadas e compactadas sobre os pavimentos (AFNOR-NF-P-98-134, 1991).

Os pavimentos que comportam esse tipo de mistura drenante são geralmente constituídos de duas camadas: uma composta por misturas asfálticas densas convencionais, e outra, que é o concreto asfáltico drenante propriamente dito.

A camada drenante é assente sobre a camada impermeável e permite o escoamento das águas pluviais pelos vazios comunicantes. Ao encontrar a camada impermeável, a água escoar devido às inclinações transversal da pista, reduzindo assim, a possibilidade de formação da lâmina d'água sobre a superfície de rolamento e aumentando a segurança no trânsito em dias de chuva.

Devido à drenagem da água superficial por seu interior, o espelhamento da superfície molhada é reduzido (quando o raio de luz dos faróis é totalmente refletido de modo que nenhum retorno de luz difusa aconteça na direção do motorista), com ganhos para a segurança, pois o motorista mantém a visibilidade que permite manobrar o veículo dentro dos limites da pista (MOMM, 2001). Para que isto aconteça, é necessário que a camada de revestimento seja capaz de drenar a água para coletores laterais localizados fora do pavimento. É necessário que a camada sob a qual se apóia a camada drenante, além de impermeável, tenha a necessária declividade.

A capacidade drenante desses concretos asfálticos é promovida pelas características da dosagem da mistura asfáltica, que são de granulometria aberta e, conseqüentemente, permeáveis. Essa mudança de conceito de mistura asfáltica onde se admite a passagem de água pelo seu interior implica em que a camada, é sujeita à ação das águas que percorrem os vazios da mistura, comprometendo sua integridade, resultando em sua desagregação (PORTO, 1999).

A diferença visual de uma superfície de revestimento de concreto asfáltico convencional e um revestimento de concreto asfáltico drenante é notada facilmente, conforme ilustra em detalhe a Figura 2.1.

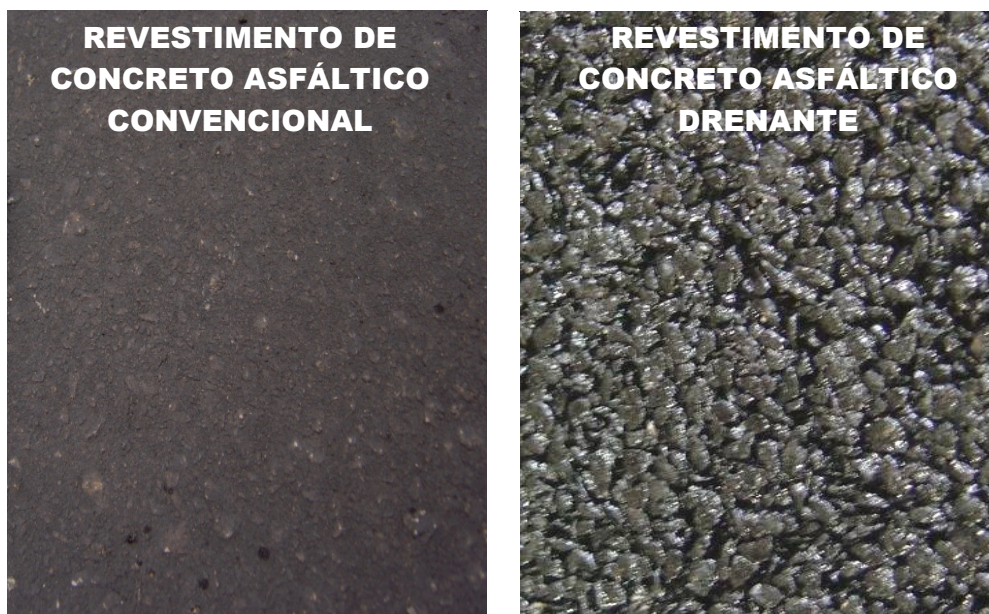


FIGURA 2.1 – Detalhe da superfície de um revestimento de concreto asfáltico convencional e drenante.

2.1.1. Permeabilidade dos concretos asfálticos drenantes

A principal característica de uma mistura asfáltica drenante está na permeabilidade elevada, que permite a passagem da água pelos vazios da mistura. É importante que se tenha uma noção de como os vazios estão distribuídos no interior da mistura, para uma correta análise da permeabilidade.

De acordo com o Projeto de Diretriz da Tecnologia de Pavimentação Drenante (ASSOCIAÇÃO DAS RODOVIAS DO JAPÃO, 1996), os vazios de uma mistura drenante podem ser classificados como (Figura 2.2):

- 1) Vazios eficazes: poros que contribuem para a passagem e armazenagem de água;
- 2) Vazios semi-eficazes: poros que não contribuem para a passagem, mas permitem o armazenamento da água; e,
- 3) Vazios ineficazes: poros que não contribuem para a passagem nem armazenamento da água.

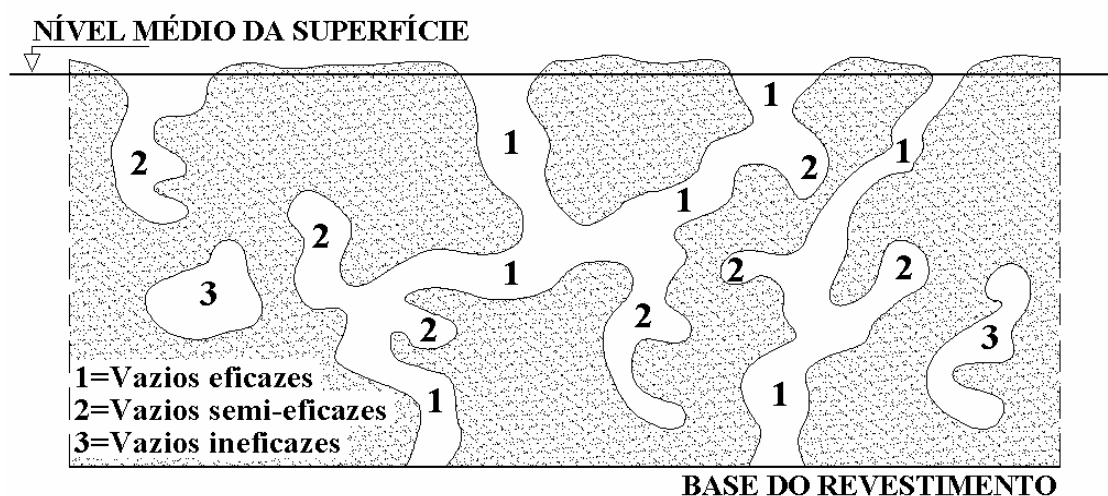


FIGURA 2.2 – Aspectos dos tipos de vazios em seção de um revestimento drenante (RUSHMOOR BOROUGH COUNCIL, 1998).

Os vazios eficazes serão os que irão assegurar a permeabilidade da mistura pois, sendo comunicantes, permitirão que a água pluvial passe pelo interior da mistura e seja conduzida para fora da região de tráfego (pista de rolamento).

Nos revestimentos impermeáveis, o escoamento das águas pluviais se dá unicamente na superfície e a lâmina d'água é tão mais espessa quanto maior for a intensidade da chuva (GNCSC – *Group National Caractéristiques de Surface des Chaussées*, 1996) (Figura 2.3).

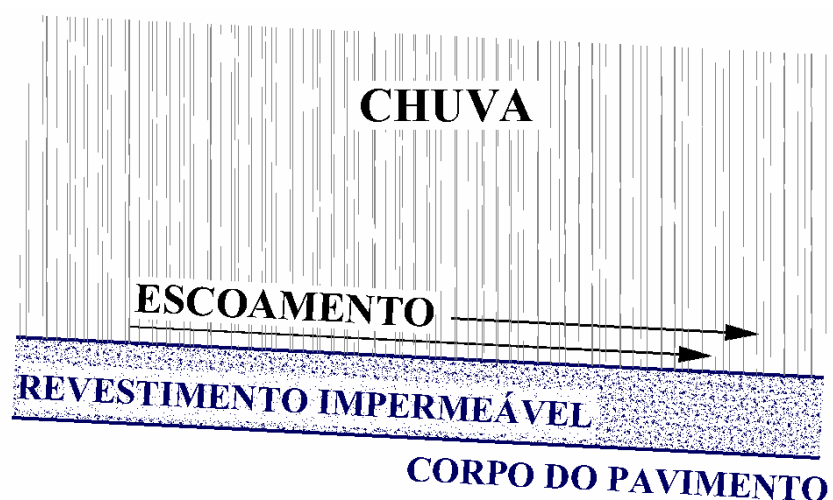


FIGURA 2.3 – Escoamento da água da chuva nos revestimentos impermeáveis (GNCSC, 1996).

Nesses revestimentos, a evacuação da água superficial é assegurada em grande parte pelos canais das esculturas dos pneus e pelos da macrotextura do revestimento. A outra parte da água é levantada pelos pneus gerando a projeção de gotículas de água, prejudiciais à visibilidade (GNCSC, 1996) (Figura 2.4).

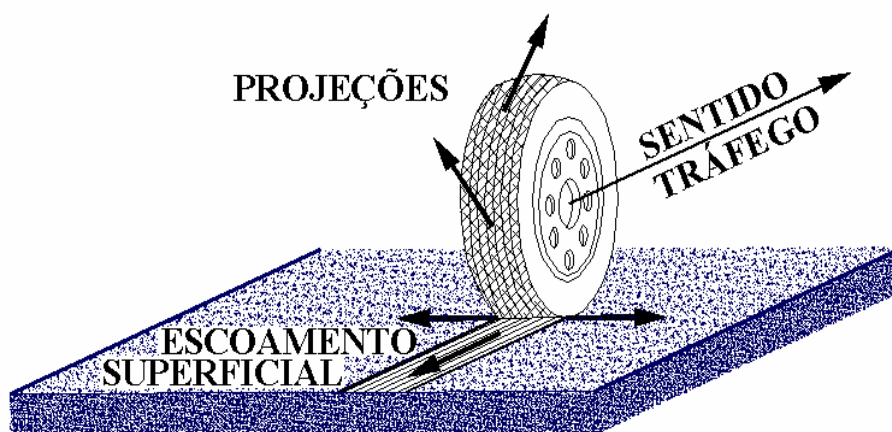


FIGURA 2.4 – Drenagem sobre um revestimento impermeável molhado (GNCSC, 1996).

O escoamento da água pluvial da superfície de um revestimento impermeável dependerá da drenabilidade do revestimento, entendendo-se por drenabilidade de um revestimento a sua capacidade em drenar a água superficial por entre suas rugosidades (MOMM, 1998).

Nos concretos asfálticos drenantes, devido à percentagem de vazios comunicantes, forma-se uma rede de canais no interior da camada de revestimento, que deve ser capaz de drenar uma grande parcela da água precipitada da chuva. Nessas condições, o escoamento na superfície ou a drenabilidade, é reduzida e a percolação se faz por infiltração da água na camada de revestimento.

A água se infiltra verticalmente (Figura 2.5) e se acumula no fundo da camada drenante, junto à camada impermeável, formando uma zona saturada (Figura 2.6). Acontece, então, o escoamento lento por percolação, devido ao gradiente hidráulico, até o bordo, se a drenagem na interface de saída for devidamente assegurada (GNCSC, 1996).

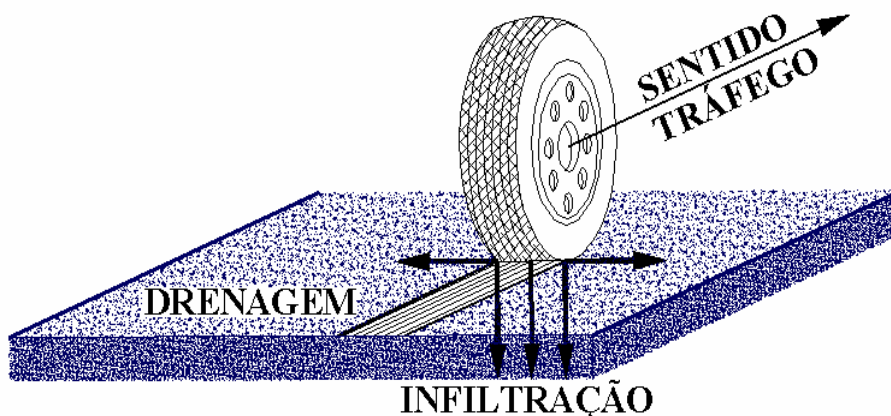


FIGURA 2.5 – Infiltração e percolação em revestimento drenante (GNCSC, 1996).

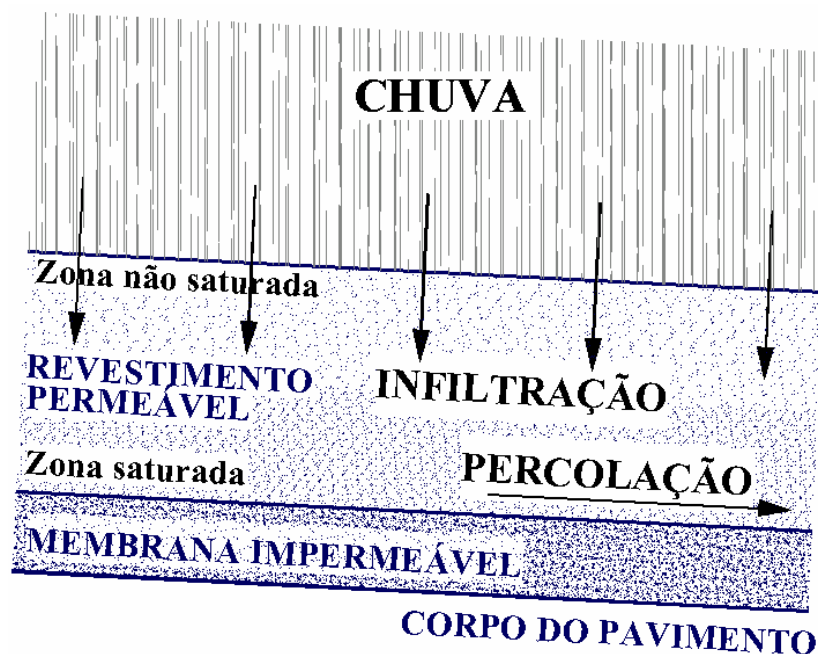


FIGURA 2.6 – Drenagem e infiltração em revestimento drenante molhado (GNCSC, 1996).

As características de condutividade hidráulica de uma mistura drenante são dadas pela composição da curva granulométrica que produz vazios na mistura asfáltica. É necessário que os vazios da mistura sejam interligados para que a condutividade da água aconteça. Essa importante característica de condutividade é afetada por (SWART, 1997; COOLEY, 1999):

- Tamanho máximo do agregado;

- Teor de vazios, mínimo inicial de 20% para manter a permeabilidade;
- Espessuras esbeltas do revestimento, que têm se mostrado suficiente para assegurar a permeabilidade;
- Declividade transversal, usualmente 2%;
- Alto volume de tráfego. Tráfego rápido ajuda a evitar o efeito de colmatação dos poros e também manter a porosidade, devido ao efeito natural de limpeza dos pneus;
- Locais expostos a poeiras;
- Interseções com rodovias não pavimentadas; e,
- Velocidade do tráfego baixa.

Quando um veículo trafega sob chuva sobre um revestimento drenante, produz-se um escoamento forçado da água sob os pneumáticos. Duas particularidades devem ser levadas em consideração (GNCSC, 1996):

- a) O filme de água na superfície é mais delgado devido à infiltração da água no pavimento; e,
- b) O escoamento forçado se produz entre os vazios comunicantes do revestimento.

Essas duas particularidades contribuem para a diminuição do risco de hidroplanagem e para a manutenção da aderência. Também, há uma contribuição importante na redução da projeção de água, por ser proporcional à espessura da lâmina d'água.

Não havendo água na superfície, não há água pulverizada na passagem rápida dos pneus sobre o revestimento molhado, minimizando a formação de névoa atrás dos veículos, conseqüentemente, melhorando a visibilidade sob chuva.

Nas rodovias, a água drenada pela camada drenante deve sair lateralmente para o bordo da pista. Para tanto, o acostamento poderá ser executado com camada drenante, de modo a evitar diferenças de altura entre a pista e o acostamento que afetem a segurança do tráfego. Problemas da colmatação dos vazios são maiores nos acostamentos do que nas faixas de tráfego, devido à ausência do efeito limpante do tráfego. Para evitar essa situação, é usual revestir os acostamentos com uma camada impermeável (HEYSTRAETEN e MORAUX, 1990).

A condutividade hidráulica, expressa em cm/s, é função da vazão da área transversal de fluxo do comprimento de percolação e da diferença de pressão. Existem diversos procedimentos para a avaliação da permeabilidade, porém normalmente são realizadas através de diversos tipos de permeâmetros.

Os permeâmetros particularmente interessantes na avaliação do desempenho dos revestimentos drenantes são: os permeâmetros de carga hidráulica variável e os de carga hidráulica constante, sendo estes, descritos a seguir.

1. Permeâmetro de carga hidráulica variável: Funciona em regime transitório de escoamento e permite que determinado volume de água escoe entre uma determinada área da superfície drenante.

O ensaio é normalizado em diversos países. O aparelho, ilustrado na Figura 2.7 é normalizado na França pela norma NF-P-98-254-3.

O procedimento do ensaio é o seguinte (MEURER FILHO, 2001):

- a) O local é saturado com a injeção de 3 litros de água;
- b) Mede-se o tempo T necessário para escoar 4 litros de água entre as alturas fixadas de 47,5cm e 21,5cm em relação à base do aparelho; e,
- c) O tempo T é transformado em velocidade de percolação média v_p pela expressão:

$$v_p = 4000 / 490 T \quad (2.1)$$

onde:

v_p – velocidade de percolação, em cm/s;

T – tempo, em segundos;

4000 – corresponde ao volume escoado, em cm^3 ; e,

490 – corresponde à seção de contato (diâmetro de 25cm).

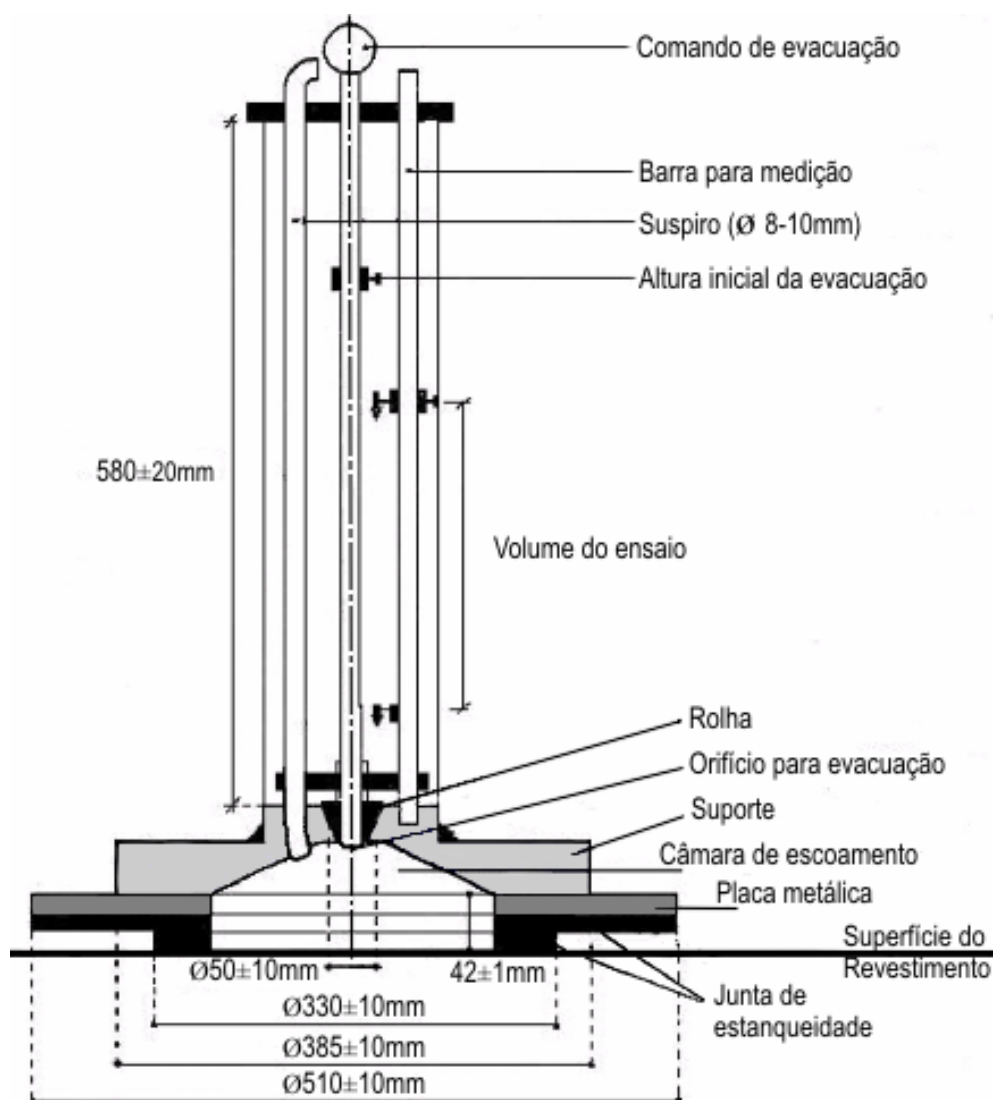


FIGURA 2.7 – Esquema do permeâmetro de carga variável, de campo (DI BENEDETTO *et al.*, 1996).

2. Permeâmetro automático de carga hidráulica constante: Como o próprio nome se refere, este aparelho funciona através de equipamentos automáticos, como: compressor de ar comprimido, bomba centrífuga e conjunto eletrônico, para medida do débito de água. A carga hidráulica constante é de 1,50m.

Este aparelho também é normalizado na França, pela norma NF-P-98-254-4. O esquema do aparelho está na Figura 2.8.

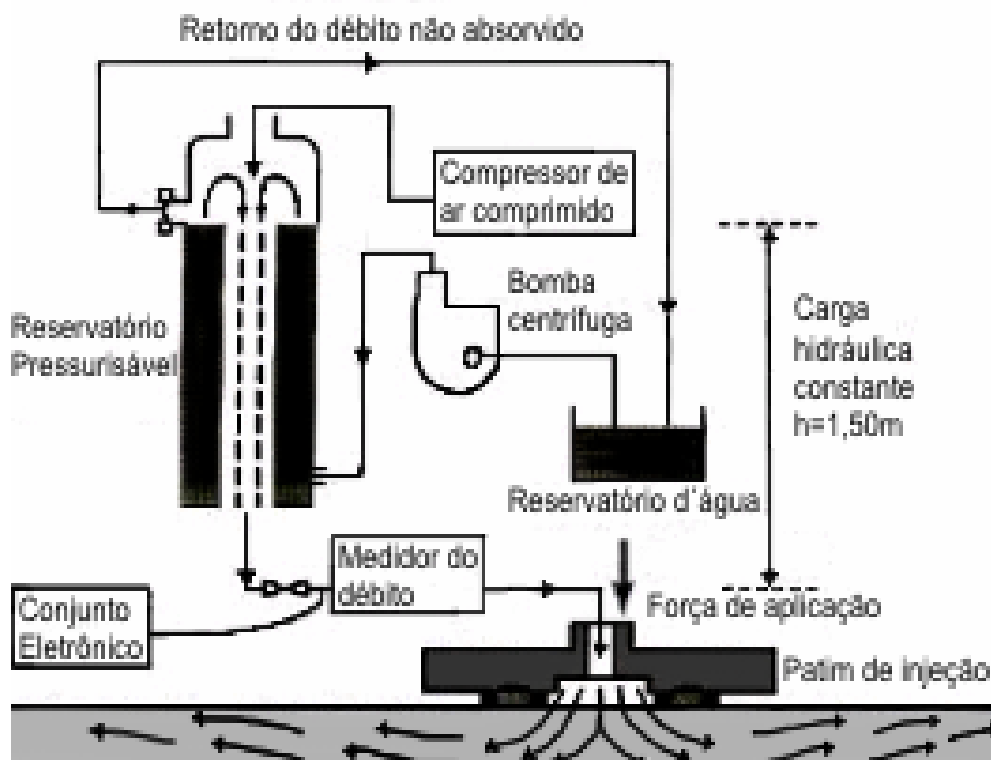


FIGURA 2.8 – Esquema do permeâmetro de carga constante (DI BENEDETTO *et al.*, 1996).

O procedimento do ensaio é o seguinte (MEURER FILHO, 2001):

- Mantém-se uma carga hidráulica constante de 1,50m de coluna d'água;
- Mede-se a vazão d'água mantendo a coluna d'água constante; e,
- Para obter-se a velocidade de percolação (v_p) faz-se a divisão da vazão obtida pela área da seção interior do patim do aparelho ($A=240\text{cm}^2$).

Para os dois aparelhos, permeâmetro de carga variável e de carga constante, a velocidade de percolação é diferente e o coeficiente de correlação entre ambos depende da espessura e da porosidade da camada drenante.

2.1.2. Aderência nos concretos asfálticos drenantes

A aderência entre o pneu e o pavimento sofre grande influência das condições climáticas, especialmente das chuvas. Em revestimentos molhados, a acumulação de água na frente do pneu do veículo faz com que pressões hidrodinâmicas sejam desenvolvidas na zona de contato pneu-pavimento e, dependendo da velocidade desenvolvida pelo veículo e da textura da superfície, a pressão resultante pode superar a carga proveniente da pressão exercida pelo pneu sobre o pavimento (OLIVEIRA *et al.*, 2003). Neste caso, o pneu perde o contato com a superfície do pavimento, ocasionando a perda do controle do veículo, sendo este fenômeno conhecido como hidroplanagem.

A interação entre o pneu e o pavimento nos dias chuvosos necessita de atenção especial, principalmente, aspectos como a quantidade d'água sobre a camada de rolamento e a capacidade de evacuação d'água pelas ranhuras do pneu e pela rugosidade da superfície do pavimento, da qual deve possuir necessárias características de textura (CARDOSO *et al.*, 1995). As vibrações causadas nos veículos pelas irregularidades e a geometria da rodovia também devem ser considerados.

De modo geral, os pavimentos, apresentam condições de aderência suficiente em situação de pista seca. No caso de pista úmida, a presença de um filme de água lubrifica o contato entre os pneus e o pavimento, facilitando o deslocamento entre os mesmos.

Tendo em vista que o problema da aderência é destacado quando a superfície da pista está úmida ou molhada, os ensaios relativos ao atrito ou aderência são sempre executados com a presença de um filme de água simulando pistas úmidas ou molhadas.

A aderência entre o pneu e o pavimento depende da força de atrito resultante do contato entre as duas superfícies (SOUZA *et al.*, 1994). A qualidade desse contato dependerá se o condutor poderá ou não, evitar um acidente. A dificuldade em identificar esse problema é agravada pelo fato que uma aderência insatisfatória, dificilmente é percebida pelo condutor, de tal modo que o mesmo possa adequar-se à situação, ajustando-se à aderência disponível.

Portanto, reduzindo a quantidade de água na superfície de um pavimento, significativamente, reduz-se o risco de hidroplanagem (NICHOLLS, 1997).

A resistência à derrapagem de uma superfície drenante molhada à alta velocidade é maior do que de uma superfície convencional molhada (LEFEBVRE, 1993), sendo isso, provavelmente, o efeito notório mais importante das superfícies drenantes (EDWARDS, 2002).

Devido à melhor aderência e ausência do espelhamento da água nos dias chuvosos, que aumenta a segurança do tráfego, a aparência de uma superfície seca apresentada por uma camada drenante sob chuva é suscetível de engendrar em alguns motoristas um sentimento excessivo de segurança, se comparada com a aderência que o pavimento realmente fornece (BELLANGER *et al.*, 1997).

2.1.3. Textura dos pavimentos

A textura é um parâmetro que pode descrever o comportamento de uma superfície da pista quanto à aderência. Possui atuação importante no atrito a altas velocidades e em pistas molhadas (ROE *et al.*, 1990). A textura superficial é uma característica da camada de superfície do pavimento relativa aos materiais componentes do revestimento e que pode ser alterada devido às degradações sofridas por estes materiais ou à instabilidade de alguma camada constituinte do pavimento (FERNANDES e DOMINGUES, 1993).

Dentre os fatores que influenciam o mecanismo de aderência entre o pneu e o pavimento, pode-se destacar o grau de regularização da textura da superfície, considerado o elemento mais importante dentre os pertencentes ao conjunto de propriedades do revestimento. A textura de um pavimento pode ser dividida em três classes:

1. Microtextura: está relacionada à aspereza da própria superfície dos agregados pétreos, os quais podem apresentar características do tipo áspera ou polida. É medida numa micro-escala de aspereza, sendo esta dependente da mineralogia da partícula do agregado (KOKKALIS, 1998; ROCO *et al.*, 2002).

A microtextura indica a propriedade dos agregados em apresentar uma superfície duravelmente áspera capaz de perfurar o filme de água residual no contato do pneu com o pavimento e, assim, oferecer atrito entre o pneu e o pavimento (LUCAS e BEGOU, 1993).

A dirigibilidade é conseguida pela microtextura pois permite a estabilidade veicular nas acelerações e desacelerações longitudinais e transversais dos veículos e a manutenção da trajetória em curvas e durante as manobras de frenagem e de ganho de velocidade (FERNANDES, 1998). No pavimento a microtextura é determinada pela natureza do agregado utilizado e secundariamente com a contribuição de partículas finas.

A microtextura de um pavimento sofre mudanças. O tráfego pesado, ajudado por poeiras finas, provoca abrasão e polimento nos agregados. O controle da resistência ao desgaste passa a ser feito pela escolha dos agregados que resistam bem ao polimento, mas o grau de polimento depende basicamente do tráfego que utiliza o pavimento e influencia o atrito à baixa velocidade (ROE *et al.*, 1990).

Contudo, a microtextura perdida, em parte, pode ser recuperada pela ação do tráfego e de precipitantes sólidos presentes na interface pneu-pavimento, que podem ter função abrasiva, recompondo-a através de fenômenos de riscagem e puncionamento na superfície do agregado (FERNANDES, 1998).

Para que a microtextura atue no comportamento da aderência é necessário que a macrotextura seja capaz de eliminar a água da interface pneu-pavimento, só então a microtextura atuará na ruptura da película d'água quando no contato da aresta da aspereza com a borracha (MOMM, 1998).

2. Macrotextura: está relacionada à rugosidade superficial do pavimento; é oriunda das partículas dos agregados pétreos que se destacam na superfície; é atribuída ao tamanho, forma, angulosidade e distribuição dos agregados graúdos. A macrotextura tem como função facilitar e contribuir para a drenagem da água na área de contato pneu-pavimento, evitando os riscos de hidroplanagem (KOKKALIS, 1998; PONCINO, 2001; ROCO *et al.*, 2002).

Quando os veículos atingem velocidades médias ou altas, a ruptura do filme d'água sobre a pista de rolamento torna-se mais difícil, devido ao menor tempo de contato pneu-pavimento. A resistência à derrapagem passa a depender da parcela do coeficiente de atrito referente às deformações dos pneus. As protuberâncias da superfície devem ser suficientemente longas e agudas para causar deformações nos pneus, mesmo com a presença da água no pavimento (SOUSA *et al.*, 1993).

A macrotextura, em função dos canais criados entre as protuberâncias, é responsável pela drenabilidade da superfície, conferindo-lhe potencialidade de escoamento da água para fora da área de contato entre o pneu e o pavimento, o que favorece a redução das projeções de água e da formação de chuviscos redutores da visibilidade (MOMM, 1998).

3. Megatextura: tipo de irregularidade indesejável ao pavimento devido à capacidade de produzir vibrações. Considerada como um defeito na superfície do pavimento, afeta consideravelmente o contato pneu-pavimento (KOKKALIS, 1998; MEURER FILHO, 2001), aumentando o custo operacional dos veículos (FERNANDES, 1998).

A aderência entre o pneu e o pavimento é fator relevante para a segurança do tráfego e necessita ser avaliada rotineiramente nas rodovias. Isso tem preocupado técnicos em todo o mundo, pois, os riscos de acidentes são maiores em pistas úmidas ou molhadas, porém, a lâmina d'água formada devido às chuvas, pode ser convenientemente diminuída e mesmo eliminada para praticamente todas as precipitações, através de revestimentos permeáveis ou drenantes, com ganhos de aderência e segurança.

2.1.4. Escoamento da água sobre os pavimentos

Durante a chuva, o fluxo de escoamento aumenta até alcançar um ponto de equilíbrio em que a quantidade de chuva precipitada é equivalente à eliminada. Após a parada da chuva, o escoamento se reduz e depois o grau de umidade da pista diminui progressivamente até a secagem da superfície. No caso de revestimentos impermeáveis o escoamento efetua-se unicamente na superfície e a lâmina d'água é proporcional a intensidade da chuva e ao comprimento do escoamento.

Quando um veículo trafega sobre um pavimento na condição molhada, há uma evacuação forçada da água que se produz entre o pneu e o pavimento, segundo três zonas distintas (Figura 2.9):

1. Zona molhada: Também conhecida como zona de evacuação d'água, situa-se imediatamente na frente da zona de contato do pneu e que depende, além da precipitação, da velocidade do veículo, da pressão de inflação dos pneus e das características drenantes da interface pneu-pavimento. É a região onde a maior parte da água deve ser evacuada para se evitar o risco de hidroplanagem;
2. Zona de transição: Também chamada de zona intermediária. É a região na qual a espessura da água residual ou filme deve ser rompido e onde o contato seco começa a surgir. Pode ocorrer a hidroplanagem se o filme de água não for perfurado pela área de contato dos pneus, ocasionando o deslocamento relativo entre a banda de rodagem do pneu e o revestimento no domínio da viscosidade da água (MOMM, 2002).; e,
3. Zona de contato seco: Também conhecida como zona seca, onde teoricamente não existe a presença da água. Acontece o contato íntimo entre a borracha dos pneus e a micro-aspereza dos granulares. É nessa zona que se desenvolvem as forças de atrito.

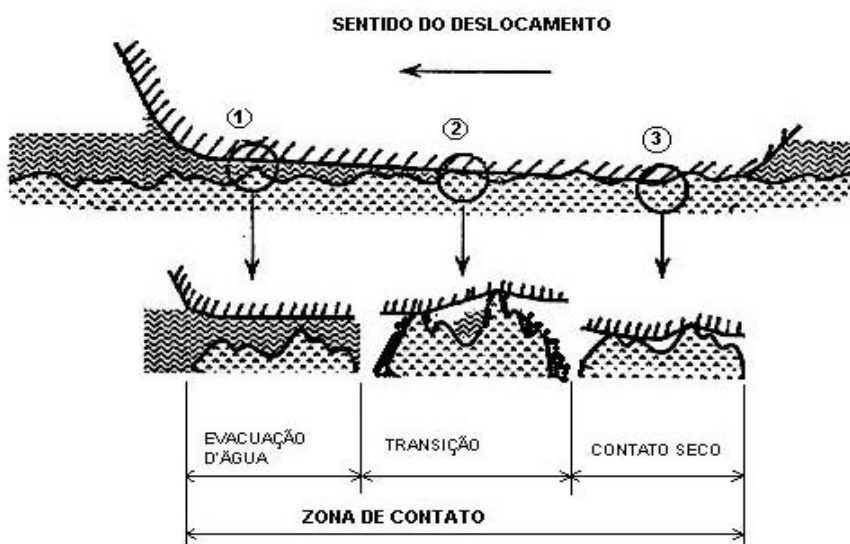


FIGURA 2.9 – Zonas de contato pneu-pavimento (MOMM, 1998).

O tamanho de cada uma das três zonas é determinado pela espessura da lâmina d'água, que, por sua vez, depende da capacidade de drenagem do pavimento, da intensidade da chuva, da profundidade das ranhuras do pneu, da pressão do pneu, da existência de macrotextura na superfície e da velocidade do veículo.

A área da zona de contato seco abrange a maior parte da área de contato entre o pneu e o pavimento. À medida que a velocidade do veículo aumenta, ocorre redução da área da zona de contato e aumento das áreas das zonas intermediária e molhada. Quando a área da zona de contato se torna nula, ocorre o fenômeno de hidroplanagem, que é a separação do pneu-pavimento devido à pressão d'água existente sob o pneu (KOKKALIS, 1998).

No contato com o pavimento molhado e na presença da lâmina d'água, acontece uma acumulação da água na frente do pneu em uma onda que, dependendo da velocidade desenvolvida pelo veículo, pode exercer uma pressão maior do que a exercida pelo pneu sobre o pavimento. Nessa situação a pressão é suficiente para erguer os pneus, e estes, estando suspensos, podem flutuar sobre a onda d'água. Esse fato marca o início do fenômeno da hidroplanagem e a velocidade que marca o início do fenômeno é chamada de Velocidade Limiar Crítica (DO, 1995; MOUNCE e BARTOSKEWITZ, 1993).

O revestimento em concreto asfáltico drenante reduz o efeito e formação da névoa atrás dos veículos em movimento nos instantes em que existe água sobre o pavimento (Figura 2.10). A imagem mostrada, revela a grande diferença entre um revestimento drenante e um revestimento denso (LCPC, 1997).

Nos pavimentos impermeáveis, a evacuação superficial da água é assegurada em grande parte pelos canais constituídos pelas esculturas dos pneus e de outra parte pela macrotextura do revestimento.



FIGURA 2.10 – Diferença entre um revestimento de concreto asfáltico drenante e um revestimento denso quanto ao efeito e formação da névoa atrás dos veículos (LCPC, 1997).

2.2. Curvas Granulométricas para Misturas Asfálticas Drenantes

As granulometrias dos concretos asfálticos drenantes apresentam uma descontinuidade na curva granulométrica e essa descontinuidade é a responsável pelo teor de vazios comunicantes, que deve ser otimizado, e daí oferecendo permeabilidade à mistura.

As graduações granulométricas dos agregados para maximizar o teor de vazios comunicantes e a permeabilidade foram estudadas por MEURER FILHO (2001). Em seu trabalho, ele utilizou um ligante asfáltico modificado por copolímeros SBS em 4%. Foram escolhidas diferentes brechas na graduação da granulometria e selecionados três tamanhos máximos de agregados, sendo estes: $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$ com brecha 0/4 (D95b04), $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$ com brecha 0/6 (D125b06) e $D_{\text{máx}}=19,10\text{mm}$ com brecha 0/9 (D191b09).

O estudo de MEURER FILHO estabelece uma composição granulométrica aberta a partir de descontinuidades em formulações granulométricas contínuas. Foram estabelecidas descontinuidades com a supressão de algumas peneiras para a obtenção da brecha na curva

descontínua para mistura drenante. Estabelecidas as descontinuidades, cada uma das curvas teve a percentagem passante recalculada para obtenção da granulometria final.

O objetivo do trabalho de MEURER FILHO foi assim colocado: “*Definir curva granulométrica para concreto asfáltico drenante que maximize o teor de vazios comunicantes, mantendo a resistência à deformação permanente e à desagregação da mistura, em limiares adequados*” (MEURER FILHO, 2001).

Para atingir o objetivo, foram moldadas seqüências de corpos-de-prova Marshall com cada curva granulométrica, combinando brechas nas graduações granulométricas dos agregados para a verificação dos teores de asfalto e analisando-se quanto aos critérios de vazios, vazios comunicantes e perdas no ensaio Cântabro.

Quanto ao esquema de execução, granulometria e curvas granulométricas, definidos por MEURER FILHO, são ilustradas nas Figuras 2.11, 2.12 e 2.13, respectivamente. Esta etapa, foi selecionada como a de melhor desempenho em seu trabalho, por obter os melhores resultados avaliados e atender todas as especificações exigidas pelas normas vigentes.

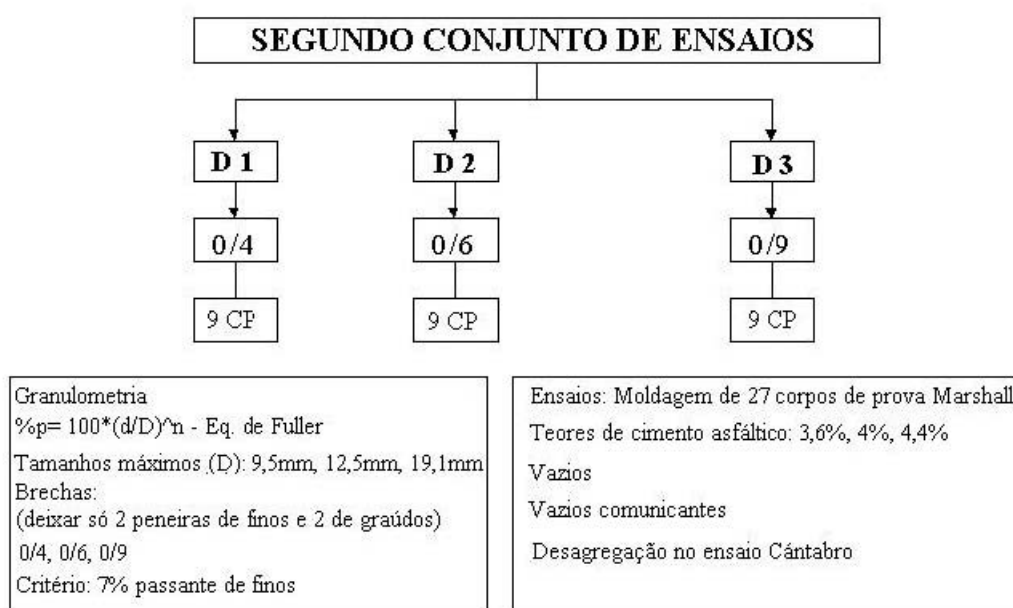


FIGURA 2.11 – Esquema do conjunto de ensaios de MEURER FILHO (2001).

Curva D Max=9,5mm Brecha 0/4

PENEIRA	25,40	19,10	12,50	9,50	6,30	4,80	2,38	1,18	0,63	0,30	0,15	0,07	Fundo	%p200 =	n =
% Passante	100,00	100,00	100,00	100,00	71,82	57,69	32,78	18,62	11,23	6,18	3,53	2,00	0,00	2,00	0,81
% Retida	0,00	0,00	0,00	0,00	28,18	14,13	24,91	14,16	7,39	5,05	2,64	1,53	2,00		
GAP 0/4	0,00	0,00	0,00	0,00	28,18	14,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,53	2,00	45,84	
% Retida	0,00	0,00	0,00	0,00	61,46	30,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,35	4,36		
% Acum	0,00	0,00	0,00	0,00	61,46	92,29	92,29	92,29	92,29	92,29	92,29	95,64	100,00		
% Passante	100,00	100,00	100,00	100,00	38,54	7,71	7,71	7,71	7,71	7,71	7,71	4,36	0,00		

Curva Dmax=12,5mm Brecha 0/6

PENEIRA	25,40	19,10	12,50	9,50	6,30	4,80	2,38	1,18	0,63	0,30	0,15	0,07	Fundo	%p200 =	n =
% Passante	100,00	100,00	100,00	81,11	59,30	48,19	28,22	16,53	10,24	5,82	3,43	2,00	0,00	2,00	0,76
% Retida	0,00	0,00	0,00	18,89	21,81	11,11	19,97	11,70	6,29	4,43	2,39	1,43	2,00	Soma	
GAP 0/6	0,00	0,00	0,00	18,89	21,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,43	2,00	44,13	
% Retida	0,00	0,00	0,00	42,80	49,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,24	4,53		100,00
% Acum	0,00	0,00	0,00	42,80	92,23	92,23	92,23	92,23	92,23	92,23	92,23	95,47	100,00		
% passante	100,00	100,00	100,00	57,20	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	7,77	4,53	0,00		

Curva Dmax=19,1 Brecha 0/9

PENEIRA	25,40	19,10	12,50	9,50	6,30	4,80	2,38	1,18	0,63	0,30	0,15	0,07	Fundo	%p200=	n=
% Passante		100,00	74,18	61,14	45,78	37,80	23,06	14,07	9,04	5,36	3,29	2,00	0,00	2,00	0,70
% Retida			25,82	13,04	15,36	7,98	14,74	8,99	5,03	3,68	2,07	1,29		Soma	
GAP 0/9			25,82	13,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,29		42,15	
% Retida			61,26	30,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,06	4,75		
% Acumul			61,26	92,19	92,19	92,19	92,19	92,19	92,19	92,19	92,19	95,25	10,00		
% Passante		100,00	38,74	7,81	7,81	7,81	7,81	7,81	7,81	7,81	7,81	4,75	0,00		

FIGURA 2.12 – Granulometria do conjunto de ensaios de MEURER FILHO (2001).

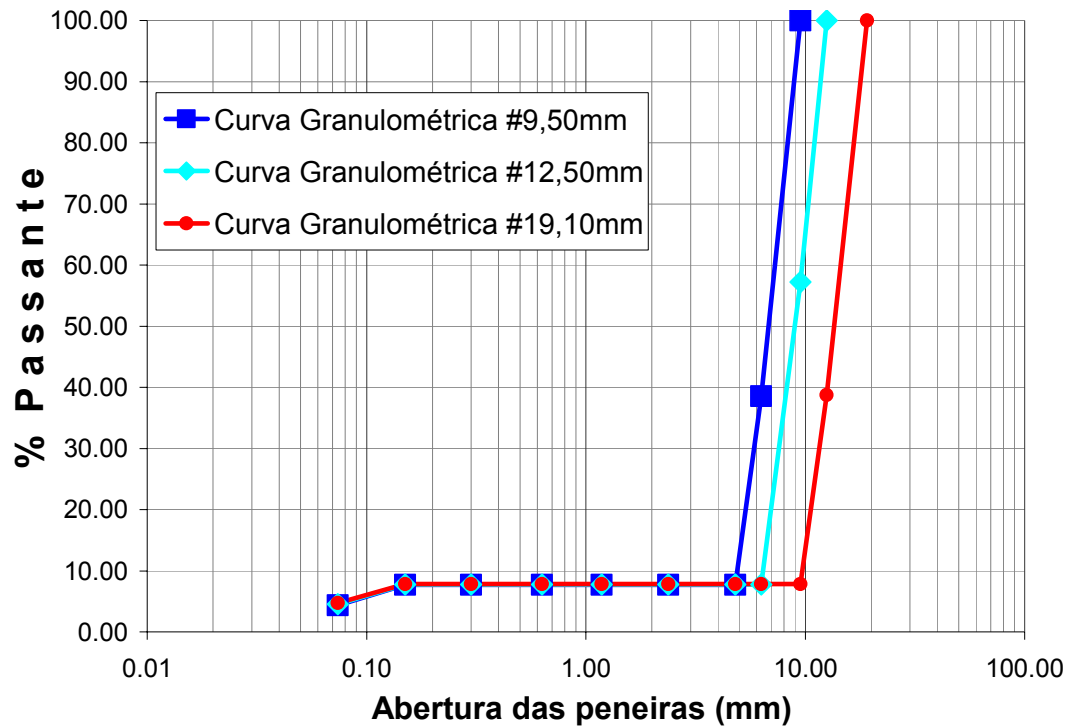


FIGURA 2.13 – Curvas granulométricas do conjunto de ensaios de MEURER FILHO (2001).

O resultado dos ensaios mostrou concretos asfálticos drenantes com percentagem de vazios comunicantes superiores a 25%, com velocidade de percolação de até 13cm/s no ensaio de permeabilidade, com perdas no ensaio Cântabro menores do que 25% e percentagem de deformação permanente menor do que 10%.

Concluiu-se que para uma determinada granulometria, o teor de ligante asfáltico influi no comportamento das misturas drenantes. E, com esse teor crescente, as percentagens de vazios, vazios comunicantes e as perdas no ensaio Cântabro foram decrescentes.

O objetivo de MEURER foi alcançado, estabelecendo uma curva granulométrica para concreto asfáltico drenante, considerando-se que foram estabelecidas granulometrias na segunda etapa que atendem aos requisitos de vazios comunicantes, permeabilidade, perdas no ensaio Cântabro e aos de deformação permanente, necessários para as misturas de concretos asfálticos drenantes.

2.3. Agregados para Misturas Asfálticas Drenantes

Os materiais granulares para utilização em concretos asfálticos drenantes devem ser escolhidos considerando que serão destinados para uma camada delgada, de topo e, portanto, deverão apresentar boa resistência à desagregação, boa e estável macrotextura e um intertravamento adequado. Deste modo, a qualidade apresentada pelos agregados é fundamental, pois a resistência à deformação permanente na mistura drenante, deve-se que, exclusivamente, ao atrito interno do esqueleto mineral.

Devido ao elevado teor de vazios nos concretos asfálticos drenantes e as suas características de alta permeabilidade, que permite passagem de água no interior da mistura, é exigida uma boa adesividade dos agregados com o ligante em presença da água.

O agregado graúdo deve ter uma resistência adequada ao polimento. Geralmente se exige um coeficiente de polimento acelerado de 0,50 em países como a Bélgica ou a Suíça, ou superior; na Alemanha é exigido 0,55. Países como a Espanha reduzem esse polimento acelerado para 0,45, devido a grande macrotextura que essas misturas apresentam. Em alguns países, é assinalado que nas misturas drenantes o agregado está menos protegido e sofre o polimento com maior facilidade e que o agregado graúdo é o único que contribui para a microtextura. Por essa razão,

seu coeficiente de polimento acelerado deve ser igual ou maior do que o das misturas convencionais (RUIZ, 1997).

As características de fabricação dos agregados são estritamente controladas em relação à granulometria e aos índices de forma (LEFEBVRE, 1993).

A qualidade de agregados finos constitui um aspecto fundamental no comportamento dessas misturas. Essa preocupação com a qualidade dos agregados finos deve-se que a quantidade destes, na mistura, é muito baixa, e assim, suas características são muito críticas na coesão do conjunto.

Alguns países aceitam o pó procedente dos agregados, porém, em outros países, se obriga a adição de fileres comerciais, como o carbonato de cálcio ou cimento, ou de certa percentagem de cal hidratada (1% a 2%). Neste último caso, argumenta-se que a cal melhora a adesividade e a resistência ao envelhecimento do mástique (RUIZ, 1997).

2.4. Ligantes Asfálticos Utilizados nas Misturas Asfálticas Drenantes

Nas misturas drenantes, a contribuição do ligante é de grande importância no comportamento mecânico do aglomerado final, responsável em evitar a desagregação pela ação do tráfego. Muitos dos danos em uma mistura asfáltica, são conseqüências do deslocamento da película de ligante na sua interface com o agregado. O processo fica acelerado pela ação da água.

A resistência de uma mistura asfáltica depende não só do intertravamento e do arranjo dos agregados, mas também da capacidade de coesão do ligante asfáltico. A capacidade do ligante em aderir à superfície do agregado, ou seja, sua adesividade, pode ser melhorada com a utilização de aditivos como a cal hidratada e aditivos químicos líquidos.

Com caracterização de mistura aberta, os concretos asfálticos drenantes têm um processo de envelhecimento mais acelerado, devido à maior superfície de contato com a ação oxidante do meio ambiente (COBO, 1997).

Os ligantes asfálticos utilizados não devem ser demasiado brandos, pois, podem alojar-se nos vazios da mistura e até produzirem instabilidades. Nos países de clima frio ou temperado, bem como nas estradas de baixo volume de tráfego, de um modo geral, o equilíbrio se encontra nos CAP 80/100. Nos países de clima quente, especialmente com tráfego pesado, a escolha é pelos CAP 60/70 (RUIZ, 1997).

As elaborações de misturas drenantes formuladas com os asfaltos puros são numerosas em vários países. Na França, esses ligantes comportam sistematicamente um dope para melhorar a adesividade. O país que mais decididamente opta pela utilização de asfaltos puros é a Holanda, onde os asfaltos modificados são recomendados somente para as situações críticas quanto aos esforços tangenciais. Nos demais países europeus, a tendência é a utilização de asfaltos modificados ou com aditivos (CORTÉ, 1997).

A utilização de asfaltos modificados baseia-se na relação custo/benefício. Os ligantes modificados implicam em custos iniciais inevitavelmente mais elevados, o que limita seu emprego em determinadas circunstâncias, principalmente porque os estudos existentes não são conclusivos sobre eventuais economias a longo prazo.

Os países que utilizam asfaltos modificados, empregam esses modificadores devido às seguintes considerações (RUIZ, 1997):

- Aumentam a espessura da película de ligante sem que ocorram escorrimientos;
- Permite aumentar a temperatura de fabricação para melhorar a adesão agregado-ligante;
- Melhoram a resistência ao arrancamento das partículas, tanto em temperaturas elevadas (devido a sua maior viscosidade), como nas temperaturas mais baixas (devido a sua maior deformabilidade); e,
- Fácil manutenção dos vazios da mistura com o correr do tempo, evitando a densificação em altas temperaturas.

As percentagens de ligante utilizadas em concreto asfáltico drenante são da ordem de (RUIZ, 1997):

- Ligantes puros : 4,3% a 4,8%;

- Ligantes modificados por polímeros: 4,5% a 5,2%;
- Ligantes modificados com borracha de pneus: 5,5% a 6,5%;
- Ligantes com fibras: 5% a 5,5% nos asfaltos puros e 5,5% a 6,8% nos asfaltos modificados; e,
- As emulsões são utilizadas na confecção dos asfaltos drenantes a frio. As desenvolvidas na Espanha, por exemplo, utilizam preferencialmente, asfaltos modificados por emulsões com percentagens de ligante residual em torno de 65%.

Os principais tipos de ligantes utilizados em alguns países da Europa para a confecção de concretos asfálticos drenantes são apresentados conforme Tabela 2.1.

TABELA 2.1 – Principais tipos de ligantes utilizados em países da Europa para concretos asfálticos drenantes (RUIZ, 1997).

País	% betume	% vazios	Tipo de ligante
Alemanha	5,3-6,5	24-28	Modificado com polímeros
Áustria	5,2	17	Modificado com polímeros
Bélgica	Puro ou modificado : 4,5 Asfalto-borracha: 5,5-6,5	Média: 19-25 Individual : 16-28	-Puros 80/100 -modificados -Asfalto-borracha
Espanha	4,5	20	Asfalto puro 60/70 e 80/100, dependendo do clima
França	-	20-28	Asfaltos puros ou modificados
Holanda	4,5	20	Puros 80/100

Na dosagem de mistura asfáltica drenante, procura-se um teor de ligante de modo que não reduza os vazios e não chegue a produzir escorrimentos (SILLER, 1997).

Quanto às características exigidas para as misturas drenantes, não há especificações de normas brasileiras, contudo, para efeito de base de referência, são comparados os resultados dos tipos de ensaios normalizados para camada porosa de atrito, regidos pela norma DNER-ES 386/99 (1999), dando a esclarecer que são dois materiais diferentes, porém, um concreto asfáltico drenante sempre terá características de uma camada porosa de atrito, mas, uma camada porosa de atrito não é um concreto asfáltico drenante.

Os valores especificados, conforme a norma brasileira para camada porosa de atrito, são apresentados na Tabela 2.2. As condições de permeabilidade são preconizadas pela especificação francesa AFNOR-P-98-134 (1991).

TABELA 2.2 – Especificações exigidas conforme norma brasileira DNER-ES 386/99 (1999).

Características	Especificações exigidas
Percentagem de Vazios	18 a 25%
Desgaste por Abrasão Los Angeles - Ensaio Cântabro	$\leq 25\%$
Resistência à tração por compressão diametral a 25°C	$\geq 0,55$ MPa

2.5. Projeto de Misturas Asfálticas Drenantes

O projeto de mistura de um concreto asfáltico drenante busca obter alta permeabilidade, resistência à desagregação e à deformação permanente nos limites aceitáveis. Fundamentalmente, deve-se obter um máximo possível de teor de vazios, mediante o uso de agregados e asfaltos de melhor qualidade, granulometria especial e dosagem adequada em laboratório (ROJAS *et al.*, 1999).

Para a determinação da resistência à desagregação e à deformação permanente, dentro dos limites adequados, são realizados ensaios laboratoriais para este fim, visando suprir as especificações das normas vigentes.

2.5.1. Desagregação

No ensaio Cântabro é importante o efeito do mástique e do ligante para manter os agregados em coesão (PÉREZ-JIMÉNEZ e MIRO, 1997), além de refletir os efeitos da variação do teor de ligante. O ensaio ainda pode ser realizado com os corpos-de-prova após submersão, comparando-se os resultados com o de corpos-de-prova não submergidos, para se determinar a suscetibilidade da mistura à ação da água (RUIZ, 1997).

O ensaio Cântabro é especialmente sensível à temperatura e também pode ser afetado pelo tamanho máximo do agregado que compõe a mistura. Quando se reduz a temperatura do ensaio,

a mistura se torna mais frágil e aumentam as perdas no Cântabro e, ao contrário, quando a temperatura é mais elevada, diminuem as perdas (PÉREZ-JIMÉNEZ e MIRO, 1997).

2.5.2. Deformação permanente

A deformação permanente (*rutting* em inglês e *ornièrage* em francês) é uma depressão na trilha-de-roda originada pela passagem das cargas, com a possível ocorrência de uma elevação ao longo das bordas dessa depressão (MERIGHI, 2000). Os estudos relativos à deformação permanente de misturas asfálticas podem ser realizados em simuladores de tráfego (MERIGHI *et al.*, 1995).

No período de 1968 a 1970, o *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* da França, desenvolveu um equipamento denominado “*ornièreur*” para auxiliar no estudo do afundamento na trilha-de-roda em misturas asfálticas das estradas francesas submetidas a tráfego pesado. É conhecido na literatura inglesa como “*LPC Whell – Tracking Rutting Test*” e na literatura brasileira como simulador de afundamento de trilha-de-roda. Este equipamento avalia o comportamento da mistura asfáltica quando submetida a um número de ciclos de uma roda passando sobre uma placa padrão (AFNOR-NF-P-98-253-1, 1993).

A manutenção da regularidade da superfície do pavimento é fundamental para o funcionamento da sua permeabilidade. Por serem constituídos por misturas abertas aplicadas como camadas de superfície, os concretos asfálticos drenantes apresentam riscos de deformação permanente elevados. Dessa forma, alguns países fazem ensaios para o controle da deformação permanente através do uso de simulador de tráfego.

Na França, esse ensaio, que consiste em submeter placas de concreto asfáltico à ação dos pneus, que descrevem sempre a mesma trajetória a uma temperatura de 60°C, é normalizado pela AFNOR-NF-P-98-253-1 (1993). Ao longo da evolução do ensaio medem-se os afundamentos na trilha-de-roda.

Esse ensaio é feito em condições severas, ou seja, condição acelerada. Mas não estão estabelecidas relações diretas entre o comportamento no ensaio e o comportamento na pista, pois existem situações em que o concreto asfáltico apresenta um bom comportamento no campo e um

comportamento ruim no ensaio. O que se pode afirmar com esse ensaio é que se o material não apresenta deformação em laboratório não apresentará riscos de deformações no campo (MOMM, 2000).

2.6. Vantagens e Desvantagens do Concreto Asfáltico Drenante

As principais vantagens da utilização das misturas drenantes em relação às misturas densas convencionais são (FONSECA, 1998):

- Redução dos riscos de hidroplanagem;
- Redução das distâncias de frenagem sob chuva;
- Aumento da distância de visibilidade e diminuição da projeção de água (*spray*);
- Menor reflexão do feixe de luz do farol do automóvel sobre o pavimento molhado;
- Maior percepção da sinalização horizontal durante o período noturno; e,
- Redução dos níveis de ruído.

Analisando essas vantagens, percebe-se que a estrutura do vazio no asfalto drenante é de importância decisiva para a drenagem da superfície e propriedades acústicas. Somente vazios abertos, que são acessíveis da superfície, podem ser eficazes para a drenagem da água como para a absorção de ruído (LEFEBVRE, 1993). Além disso, sob as condições de tráfego, o ruído ocasionado pelo contato pneu-pavimento dos veículos também é parcialmente absorvido pelos vazios na camada (MORAUX, 1989).

A utilização de revestimentos asfálticos drenantes reduz consideravelmente o número de acidentes de trânsito e diversos países fazem acompanhamento desse número antes e depois de sua aplicação. Um estudo realizado no Japão, em determinadas rodovias, comprovou que houve uma redução em torno de 75% dos acidentes ocorridos (KAMIYA *et al.*, 1998). Na França, por exemplo, o número de acidentes com o pavimento na condição molhada é praticamente o dobro, quando comparado com o pavimento na condição seca (PONCINO, 2001).

Um dos principais problemas encontrados em revestimentos drenantes é a colmatação dos poros ao longo da vida útil, o que reduz gradativamente as funções de drenagem e acústicas do pavimento, como o desgaste muito acelerado da sinalização horizontal.

2.7. Classificação do Concreto Asfáltico Drenante Quanto ao Número de Camadas

Os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados segundo alguns aspectos, tais como o tipo e número de camadas, o volume de vazios e a existência ou não de uma lacuna (brecha) bem definida na composição granulométrica (MOMM, 2002).

Com relação ao número de camadas, recentemente vêm sendo utilizados pavimentos drenantes em duas camadas: a superior, com granulometria menor e com a função de superfície, e a inferior, com agregados maiores e atuando na estocagem (MOMM, 2002; MEURER FILHO, 2001).

Com relação à percentagem de vazios, os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados em três categorias (MOMM, 2002):

- a) 1ª Geração: misturas com teores de vazios em torno de 20%. Com a utilização pelo tráfego e o decorrer do tempo da vida do revestimento, nas misturas dessa geração, a colmatção induz a uma perda de permeabilidade de até 50% nas zonas de tráfego de veículos e pode-se ter até permeabilidade nula nas zonas de pouco tráfego, onde os revestimentos não podiam mais ser considerados como permeáveis (GANGA *et al.*, 1997). Do mesmo modo, porém, com proporção diferente, acontece redução no conforto quanto aos ruídos (MICHAUT, 1997). Assim, para evitar a rápida colmatção dessas misturas, busca-se aumentar o teor e vazios da misturas (RUBIO e COLAS, 1997), passando então para a segunda geração dessas misturas;
- b) 2ª Geração: misturas com teores de vazios entre 20% a 25%. Na busca de reduzir a colmatção inicial, constituíram-se misturas unicamente de material granular, em que a velocidade de escoamento passou a 2,0cm/s, 60% a mais do que as primeiras misturas. Devido ao elevado teor de vazios a mistura apresentava maiores riscos de perda de integridade, passaram a ser utilizados então ligantes modificados por elastômeros; e,
- c) 3ª Geração: misturas com teores de vazios superiores a 25%.

Para que uma mistura asfáltica drenante tenha uma alta percentagem de vazios, a experiência demonstra que os agregados utilizados na confecção das misturas sejam de boa qualidade e alta resistência, e que as curvas granulométricas sejam abertas, podendo apresentar ou não uma descontinuidade acentuada. Também é necessário que a quantidade de ligante seja limitada na

mistura, de modo que não preencha os vazios, mas assegure uma coesão eficiente (HEYSTRAETEN e MORAUX, 1990).

Com a existência da brecha na granulometria, pode-se classificar os concretos asfálticos drenantes como possuindo uma lacuna bem definida na composição granulométrica dos granulares. Essa lacuna bem definida apresenta maior eficiência no que diz respeito à permeabilidade.

Os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados conforme a camada onde são utilizados e também quanto ao seu número, seja:

- Camada de Superfície, em uma camada;
- Camada de Base, em uma camada; e,
- Camada de Superfície, em duas camadas drenantes.

2.7.1. Concreto asfáltico drenante em uma camada de superfície

Os concretos asfálticos drenantes são utilizados como uma camada de superfície (desconsiderada como camada estrutural), com características para atender às condições de rolamento (aderência), aos esforços tangenciais (desagregação), verticais (resistência à deformação permanente), entre outros.

O uso de camadas mais espessas em revestimentos drenantes, além de riscos de deformações permanentes, ainda não é expressivo e tem-se considerado suficiente a capacidade de absorção da água com espessuras mais esbeltas, por exemplo, de 4cm. Camadas mais finas que 2,5cm poderiam conduzir a um comportamento ruim sob chuvas fortes e reduzir a durabilidade da camada (HEYSTRAETEN e MORAUX, 1990).

Com exceção da Holanda, com espessuras de 5cm para as misturas 0/16, as camadas visam tirar partido da capacidade de permeabilidade da mistura drenante e dos efeitos da porosidade elevada e contínua de toda a espessura da camada. Em pesquisas realizadas para espessuras mais espessas, algumas até com 10cm, para aumentar o ganho sobre a absorção acústica, verificou-se

que com o aumento de espessura há uma melhor absorção das baixas frequências, que é um elemento favorável nos casos de elevado tráfego de veículos pesados.

2.7.2. Camada de base

A utilização em camadas de base é aplicada principalmente com a finalidade de estocar a água da chuva. O seu uso, com ou sem revestimento drenante, constituiu-se em uma solução interessante de controle das águas pluviais em meios urbanos.

A estocagem temporária da água na base permite a atuação como pavimento reservatório, acumulando parte da água pluvial e oferecendo uma redução na velocidade de escoamento dessas águas. Particularmente, é interessante seu uso em grandes superfícies revestidas, como as zonas de estacionamento de grandes centros comerciais em regiões de precipitações intensas, onde a atuação como pavimento reservatório atenua danos causados por chuvas intensas, além de permitir a estocagem elevada de água.

2.7.3. Camadas de superfície em duas camadas drenantes

Dois são os conceitos principais quanto à utilização em duas camadas e diferem principalmente quanto às espessuras das camadas e às suas granulometrias (CORTÉ, 1997):

1. Conceito “*Twinlay*”: Essa concepção de revestimento teve origem na Holanda em 1990 e refere-se a uma camada de rolamento com 2,5cm de espessura, com agregados de granulometria 4/8 em torno de 94%, sem areia, em torno de 6% de finos e com 6,5% de teor de ligante. Essa camada apresentou:

- Boa aderência para numerosos pontos de contato;
- Fraco ruído de rolamento do tráfego devido ao pequeno tamanho dos agregados; e,
- Função de filtro, para capturar os poluentes na superfície.

Essa camada assenta-se sobre outra camada drenante, com 5cm de espessura, confeccionada com agregados de diâmetro máximo maior (fração 11/16), uma pequena quantidade de areia (em torno de 10%) e 3% de finos. Essa camada assegura:

- Constituir um volume importante de estocagem de água;
- Permitir uma evacuação rápida da água devido às elevadas dimensões dos vazios; e,
- Absorver os ruídos de rolamento.

2. Conceito DDL (*Double Draining Layer*): Semelhante ao conceito “*Twinlay*”. Experimentos na Itália, em 1995, referem-se a uma espessura de 1,5cm na camada superior, com os agregados sob uma fórmula 0/6 descontínua, constituída de 84% de agregados fração 4/6, 8% de areia 0/2 e 8% de finos. A camada inferior tem uma espessura de 3,5cm e a mistura apresenta agregados mais graúdos (fração 8/12), também com 8% de areia 0/2 e 8% de finos.

A camada superior é concebida para atuar como um filtro e a inferior, com granulometrias maiores e maior habilidade de drenagem, atua principalmente para uma descarga das águas da chuva e das impurezas carregadas pela água.

2.8. Intervenções para manter as qualidades drenantes

As qualidades drenantes e acústicas da mistura degradam-se principalmente devido a colmatagem dos vazios. Conforme o tipo e a utilização do revestimento, esse processo poderá ser mais ou menos longo.

Os fatores dos quais dependem a colmatagem de um revestimento drenante são (BOCHOVE *et al.*, 1997):

- Quantidade da poluição;
- Tamanho e estrutura dos vazios;
- Declividade da camada densa subjacente à camada drenante; e,
- Velocidade e efeito limpante do tráfego. Normalmente a colmatagem é menor na trilha-de-roda devido ao efeito limpante do tráfego.

Para a manutenção das propriedades drenantes e acústicas é possível à limpeza dos pavimentos drenantes de forma regular durante a sua vida útil. Embora alguns técnicos defendam a ação de limpeza pelo efeito do próprio tráfego. Quando a velocidade de operação é alta, as experiências registradas na literatura, mostram que esse efeito não é tão sensível (PORTO, 1999).

Um processo adotado por alguns países, mas não muito usual pois é muito custoso, é a utilização de máquinas autopropulsadas para o trabalho de limpeza. Essas máquinas, possuem um dispositivo de espargimento e aspiração de água. A água utilizada na limpeza é recuperada em grande percentagem, filtrada e reutilizada pelo equipamento para a continuação do processo.

Cada pavimento terá suas necessidades próprias de limpeza em diferentes intervalos de tempo, mas, como medida geral, deve-se pensar no ano seguinte à sua construção, como o tempo limite para se considerar a necessidade de limpeza. Valores experimentais, têm demonstrado que através da limpeza, a perda de permeabilidade que se pode produzir no primeiro ano é recuperável em torno de 50% e que, se mantendo a frequência anual do procedimento as perdas do segundo ano, podem ser recuperadas em até 70% (RAZ, 1997).

Não há época do ano mais ou menos propícia para a limpeza, mas recomenda-se que nas estradas próximas a áreas agrícolas, o ideal é imediatamente após a safra. Para misturas drenantes mais antigas, ou que se limpem pela primeira vez, é recomendado fazê-lo após chuvas prolongadas, assim que a climatologia permita.

Uma comparação em rodovias espanholas da evolução da colmatação entre pavimentos drenantes tratados com limpeza e os não tratados é apresentado conforme ilustra a Figura 2.14.

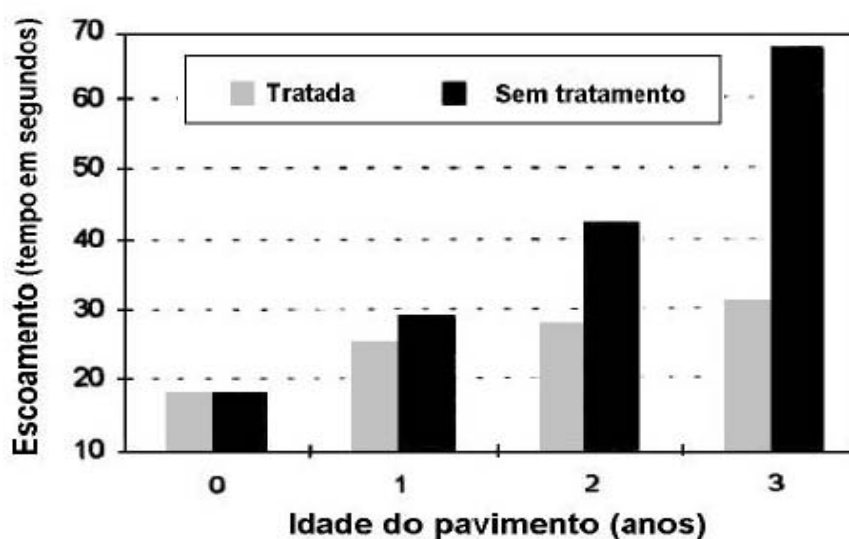


FIGURA 2.14 – Evolução da colmatação entre pavimentos tratados com limpeza e não tratados (RAZ, 1997).

Para a frequência de limpeza não há uma regra fixa, porém, a experiência espanhola, recomenda que uma boa medida de limpeza, seja uma vez por ano, que é quando o ciclo agrícola, calor, frio, gelo e chuva, for completado (RAZ, 1997).

2.9. Intervenções para reparos

Os principais problemas da conservação da superfície da pista decorrem da perda de partículas que podem ocorrer em áreas localizadas. Devido à ação do tráfego, este processo uma vez iniciado, evolui com rapidez. Estes problemas geralmente decorrem de temperaturas de espalhamento inadequadas, deficiência na compactação e excesso de ligante. Nesses casos, a solução tem sido substituir a superfície deteriorada por outra (RUIZ *et al.*, 1990).

No caso de ser necessária a reparação, quando bem localizada (menor que três metros de extensão no sentido longitudinal), não afeta o escoamento transversal. A aplicação de misturas asfálticas tradicionais nas reparações localizadas, também não expõe a pista problemas particulares, entretanto, em todos os casos, o plano de junção do reparo com a pista original representa um local fragilizado, no qual poderão se produzir agravações na integridade ao longo do tempo (BROSSEAUD, 1997).

2.10. Durabilidade do Concreto Asfáltico Drenante

A durabilidade do concreto asfáltico drenante quando de uma mistura bem formulada, é idêntica a dos concretos asfálticos convencionais. Devido à alta percentagem de vazios o ligante envelhece mais rapidamente, mas, tendo em vista uma maior espessura do filme de asfalto no agregado, devida à baixa superfície específica da granulometria, se comparada com o asfalto denso. As misturas drenantes têm apresentado um bom comportamento em sua vida útil e a experiência do uso mostra uma excelente resistência à formação de trilhas-de-roda (BONNOT, 1997).

Para se garantir a durabilidade dessas misturas, deve-se evitar a utilização dos concretos asfálticos drenantes nos locais sujeitos a fortes esforços tangenciais, tais como zonas de frenagem, rotatórias, curvas com pequenos raios, cruzamentos, entroncamentos, semáforos, como também, não pode ser utilizados sobre camadas de suporte com fissuras. Devem ser

aplicados sobre superfícies sem deformações permanentes, pois, as superfícies com depressões podem acumular água (ORUE-ESCHEVARRIA *et al.*, 1997).

2.11. Efeito das Propriedades do Ligante Modificado por Polímeros em Misturas Asfálticas

Estudos realizados em laboratório para avaliar o efeito do uso de ligantes modificados na fabricação de misturas drenantes resultaram nas vantagens de usar polímeros nas propriedades e características dessas misturas (PÉREZ-JIMÉNEZ e GORDILLO, 1990).

Durante muitos anos, inúmeras pesquisas foram realizadas no sentido de produzir revestimentos asfálticos mais flexíveis, menos suscetíveis às temperaturas, mais resistentes à ação do tráfego e, por consequência, de maior durabilidade.

Um ligante modificado difere do ligante asfáltico tradicional que lhe deu origem, em termos de suas propriedades físicas e reológicas e em termos da sua composição química. A modificação do ligante só ocorre efetivamente quando a alteração de propriedades é originada numa reação química entre o ligante asfáltico e o agente modificante (MORILHA JUNIOR, 2004).

A modificação das propriedades dos ligantes pela adição de polímeros é explicada pelo inchamento do polímero nos maltenos do CAP. O inchamento acarreta aumento de viscosidade e desenvolvimento do caráter gel do ligante, tornando-o mais elástico e resistente ao estiramento. A taxa de inchamento é dependente do modo de preparo da mistura (LEITE, 1999).

Em qualquer caso, a incorporação de polímeros ao ligante asfáltico, dará lugar a interações entre as moléculas do primeiro e os componentes do segundo, produzindo alterações no sistema coloidal e mudando propriedades reológicas do ligante original, melhorando as propriedades mecânicas numa grande faixa de temperatura (SOTO, 1997).

Os ligantes modificados por polímeros contribuem para o uso em condições rigorosas de serviço em pavimentação, tais como: no preparo de superfícies em rodovias de concreto, área sujeita a freqüente frenagem, área de estacionamento suportando cargas pesadas, intercadas aliviadoras de esforços, lençol de impermeabilização, entre outros (CHOQUET e ISTA, 1990).

Estes modificadores também melhoraram as propriedades reológicas e físicas dos ligantes asfálticos. Apresentam resistência à temperatura de trabalho, facilidade de mistura com o ligante base, disponibilidade no mercado e custo compatível para se configurar em uma alternativa de desempenho, praticidade e economia (REIS, 2002).

Dentre os polímeros mais utilizados na modificação de asfaltos citam-se o SBS (eStireno-Butadieno-eStireno), EVA (poliEtileno-Vinil-Acetato), SBR (eStireno-Butadieno-Rubber), entre outros.

Os polímeros são produtos de origem orgânica, inorgânica ou sintética, de alto peso molecular, cuja estrutura molecular consiste da ligação por reação química de pequenas unidades chamadas monômeros. Esta reação é denominada polimerização e o tamanho final da molécula oriunda da reação com os polímeros é conhecida como macromolécula. Caso o polímero seja composto de monômeros idênticos, este polímero é classificado como homopolímero, caso seja composto de espécies diferentes de monômeros é classificado como copolímero (BILLMEYER, 1984).

Um exemplo de homopolímero é o polietileno (material de sacos plásticos) que é um produto obtido da polimerização de etileno (gás petroquímico). Um exemplo de copolímero é o SBS (eStireno-Butadieno-eStireno) que é um produto da polimerização de estireno e butadieno (material este utilizado na modificação de ligantes asfálticos).

Com isso, a modificação dos ligantes asfálticos pela incorporação de polímeros permite alcançar algumas características diferenciadas e fundamentais, tais como (DNER, 1998; REIS e SANTO, 1999; ASPHALT ACADEMY, 2001):

- Melhoria da suscetibilidade térmica. A consistência do ligante asfáltico modificado tende a permanecer inalterada sob uma larga faixa de temperaturas. Em climas frios, o ligante permanece mais flexível e aumenta a resistência do revestimento à fissuração e ao trincamento. Em climas quentes, o maior ponto de amolecimento e a maior viscosidade do ligante aumentam a resistência à deformação permanente;
- Resistência maior ao envelhecimento. A maior viscosidade do ligante modificado incrementa a espessura de película sobre o agregado, esta característica protege o ligante e o revestimento do envelhecimento acelerado;

- Resistência coesiva. Os ligantes modificados possuem maior capacidade de manter os agregados da mistura unidos;
- Poder de adesão. Aumentam a resistência da película de ligante ao arrancamento da superfície do agregado, principalmente pela ação da água; e,
- Recuperação elástica. O ligante modificado mantém a integridade do revestimento, mesmo quando sujeito a níveis elevados de deformação, ao contrário do comportamento puramente dúctil dos ligantes asfálticos convencionais.

Distinguem-se duas grandes famílias de polímeros utilizados nos ligantes para pavimentação:

1. Polímeros Termoplásticos: apresentam comportamento semelhante ao do ligante quando em temperatura elevada, ou seja, amolecem com o efeito do calor. Os empregados mais comumente é o polietileno (PE), o polipropileno (PP) e copolímeros de etileno-acetado de vinila (EVA). Esta última família de polímeros, no entanto, carece de propriedades elásticas acentuadas; e,
2. Elastômeros: dentro dessa grande família, os mais conhecidos por seu uso em modificação de ligantes asfálticos são os copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS) e o etileno-propileno-dieno (EPDM). Esses polímeros, diferentemente dos da família anterior, contribuem de forma substancial para as melhorias das propriedades elásticas e da coesão.

Nos elastômeros SBS, o estireno confere ao ligante, viscosidade importante em temperaturas elevadas, enquanto que o butadieno, confere ao ligante uma grande elasticidade em uma larga faixa de temperaturas e, mais particularmente, em baixas temperaturas (PORTO, 1999). Assim, os polímeros SBS, diminuem a suscetibilidade térmica do ligante, sobretudo à fragilidade no frio, aumentando a coesão e melhorando os concretos asfálticos drenantes quanto à desagregação e ao cisalhamento (SERFASS *et al.*, 1997).

2.12. Efeito das Propriedades do Ligante Modificado por Borracha Moída de Pneus em Misturas Asfálticas

O uso de asfalto-borracha na pavimentação está cada vez mais crescente nos dias atuais (SALINI, 2000). A melhoria do conforto no uso das rodovias, associada com a proteção do ambiente pelo controle de desperdícios, têm incentivado para a modificação de ligantes pela incorporação de borracha em pó, recuperada de pneus usados.

Estudos de laboratório indicam claramente relevantes aspectos da borracha moída de pneu nas misturas drenantes, com as seguintes vantagens (ISTA e CHOQUET, 1990; SAINTON, 1990):

- Bom comportamento sob tráfego de caminhões pesados;
- Resistência ao cisalhamento;
- Grande elasticidade;
- Ótima aderência;
- Resistência ao envelhecimento;
- Reduz o nível de ruído provocado pelo atrito pneu-pavimento;
- Indiferença no comportamento funcional para tempos chuvosos;
- Possibilitam uma melhor resistência à derrapagem; e,
- Flexibilidade à baixa temperatura.

Os ligantes modificados por borracha moída de pneus apresentam maiores relações de viscosidades comparativamente ao ligante asfáltico original. Este aumento de consistência era esperado pelo alto teor de borracha utilizado na fabricação destes ligantes asfálticos. Para estes ligantes, a interpretação do comportamento é diferente dos demais, pois a ação da borracha no ligante após envelhecimento, propicia um aumento significativo de recuperação elástica, tornando a mistura asfáltica mais dúctil (MORILHA JUNIOR, 2004).

O aumento de consistência, em termos de viscosidade, não deve ser considerado como sinônimo de aumento da rigidez do ligante asfáltico, pois a ação da borracha no ligante, propicia um aumento na recuperação elástica, tornando o ligante asfáltico e por conseqüência a mistura asfáltica, mais dúctil e elástica (WYNGAARD, 2003). Além disso, cercados pela borracha moída de pneus, os asfaltenos e as resinas do ligante asfáltico ficam protegidos contra a oxidação (MORILHA JUNIOR, 2004).

Uma das principais vantagens do ligante modificado por borracha moída de pneus é que a sua relação temperatura/viscosidade não é linear. Ele é mais viscoso que o ligante tradicional, mas não perde a ductilidade e quando sujeito a alta temperatura e não reduz tanto a sua consistência quanto os ligantes convencionais. Desta maneira, diminui a possibilidade de trincamento a baixa temperatura e formação de trilhas-de-roda em temperatura elevada (SPECHT e CERATTI, 2003).

Adicionalmente, segundo SPECHT e CERATTI (2003), são transferidas para o ligante asfáltico algumas características químicas das borrachas vulcanizadas como inibidores de raios ultravioletas e antioxidantes que melhoram muito a resistência ao envelhecimento. Esta, pode ser considerada uma das grandes vantagens em relação aos ligantes asfálticos tradicionais.

Outro aspecto importante, é que a mistura de ligante asfáltico e a borracha moída de pneus, não consiste de reação química, mas de absorção de óleos aromáticos do cimento asfáltico nas cadeias do polímero da borracha. As partículas de borracha são inchadas a altas temperaturas e formam um gel com aumento de viscosidade da ordem de 10. O ligante modificado por borracha moída de pneus tende a tornar-se mais dúctil, mais viscoso e com melhor suscetibilidade térmica (LEITE *et al.*, 1999).

2.13. Efeito das Propriedades do Ligante Incorporando Fibras de Celulose em Misturas Asfálticas

Numerosos testes realizados, tanto em laboratório como em rodovias, têm confirmado a ação anti-escoamento do ligante propiciado pelas fibras de celulose, do qual é possível desenvolver um alto desempenho do ligante modificado com um menor teor de ligante, além, de resolver o problema de escoamento do ligante (DECOENE, 1990).

Pouca diferença há no comportamento de escoamento entre os concretos asfálticos drenantes adicionado com 0,3% e 0,5% de fibras, sendo esta última, utilizada em experiências na Argentina (BOLZAN, 2000a), constatando-se que com valores maiores, ocorrem problemas com a determinação do teor ótimo da mistura. Entretanto, uma das conclusões dos ensaios realizados com adição de 0,3% de fibras de celulose, permite um aumento do teor de ligante e sua durabilidade (DECOENE, 1990).

2.14. Considerações Finais

As novas aplicações em tecnologias de revestimentos estão exigindo que os ligantes apresentem propriedades diferenciadas, ou seja, maior coesão, maior adesão aos agregados, boa resistência ao envelhecimento e suscetibilidade térmica mais adequada, refletindo em maior resistência à fadiga e à deformação permanente.

Os concretos asfálticos drenantes representam um avanço considerável nas qualidades de segurança e conforto do tráfego, apesar de estarem em evolução. A somatória das pesquisas em todo o mundo já permite técnicas de formulação das misturas de construção e de manutenção que garantam sua qualidade.

Embora com custos mais elevados do que as misturas densas tradicionais, as qualidades de um tráfego mais seguro e confortável devem ser levadas em conta, pois, a qualidade de vida da população também entra em jogo na viabilidade desse tipo de revestimento. Dessa forma, a redução dos riscos de acidentes, redução dos níveis de desconforto sonoro, tanto no interior dos veículos quanto na vizinhança das vias, o aumento da visibilidade e da aderência sob chuva viabiliza a construção desse tipo de revestimento.

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS EMPREGADOS

Na análise de misturas asfálticas, apesar da patente importância do ligante asfáltico, outras variáveis também são intervenientes, como por exemplo, a natureza, forma e textura dos agregados, sua granulometria – que para as misturas de concretos asfálticos drenantes é fundamental, a presença de cal e a dosagem da mistura em termos de teor de ligante asfáltico e percentagem de vazios. Portanto, as análises dessas propriedades devem ser conduzidas com critérios e procedimentos bem definidos.

3.1. Caracterização dos Materiais Utilizados na Pesquisa

São apresentadas a caracterização física e reológica dos ligantes asfálticos pesquisados e a caracterização dos demais insumos utilizados: agregados e cal hidratada CH-III.

Alguns dos materiais, separados e peneirados, para a preparação dos corpos-de-prova são ilustrados conforme Figura 3.1.

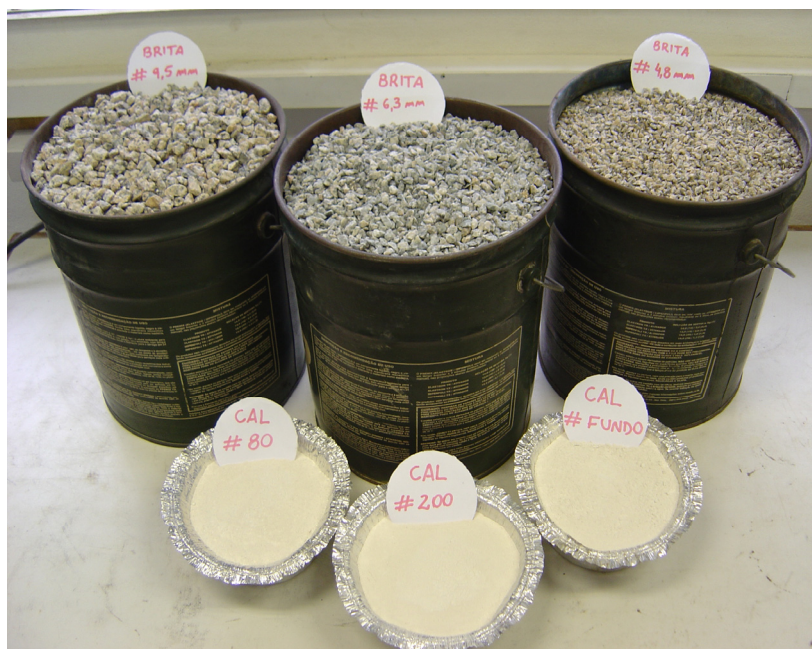


FIGURA 3.1 – Materiais selecionados (agregados e cal) para os ensaios.

3.1.1. Agregados

As características necessárias para os agregados no concreto asfáltico drenante são semelhantes às exigidas nas demais misturas asfálticas. Os agregados graúdos devem formar um esqueleto mineral resistente e estável para o qual se exigem resistência à desagregação, forma cúbica e uma alta percentagem de faces fraturadas. Também é necessária limpeza, boa adesividade e que não estejam em processo de alteração. Além dessas características, o agregado graúdo deverá apresentar alta resistência ao polimento.

Os agregados utilizados para esta pesquisa são da região da Grande Florianópolis, oriundos de uma pedreira localizada em Forquilha, no município de São José.

A brita produzida provém da suíte intrusiva São Pedro de Alcântara, sendo formada por granito de coloração cinza claro, com estrutura delineada e granulação variável de média a grossa. A britagem se processa em central convencional, constituída por britadores primários de mandíbula, secundários com girofêricos cônicos e sistema de peneiramento tradicional.

O material coletado foi primeiramente seco ao ar e, posteriormente, separado por peneiramento, na seguinte série de peneiras: 38,1mm; 25,4mm; 19,0mm; 12,5mm; 9,5mm; 4,75mm, 2,36mm; 1,18mm; 0,6mm; 0,3mm; 0,15mm e 0,075mm.

O agregado apresentou um desgaste no ensaio de abrasão Los Angeles de 17%, atendendo a especificação, conforme método de ensaio DNER-ME 035/98 (1998).

O ensaio de adesividade para ligantes asfálticos, conforme método de ensaio DNER-ME 078/94 (1994), apresentou adesividade insatisfatória, baseada no deslocamento da película do ligante asfáltico, necessitando da adição de melhorador de adesividade (*dope*), no teor de 1% em relação ao peso do ligante asfáltico.

O agregado miúdo (pó-de-pedra) foi submetido ao ensaio de equivalente de areia segundo as especificações do método de ensaio DNER-ME 054/97 (1997), sendo que o valor obtido foi de 72,88%, o que satisfaz o mínimo de 55%. A absorção do agregado foi de 0,87%.

A densidade real dos agregados foi determinada através do método de picnômetro (agregado miúdo) e da balança hidrostática (agregado graúdo) (norma DNER-ME 117/94). A Tabela 3.1 apresenta os valores encontrados.

TABELA 3.1 – Densidade real dos granulares.

Abertura das Peneiras (mm)	Densidade Real
25,50	2,647
19,10	2,652
12,50	2,666
9,52	2,707
4,75	2,628
2,36	2,628
1,18	2,603
0,63	2,623
0,30	2,622
0,15	2,623
0,075	2,621
Média	2,638

3.1.2. Ligantes Asfálticos

Foram utilizados dois diferentes tipos de ligantes asfálticos na pesquisa, sendo estes, um CAP-50/60 (origem Fortaleza/CE) para as misturas com fibras de celulose e ligantes modificados por polímeros Eastman EE-2 e um CAP-20 (origem Araucária/PR), para as misturas modificadas por borracha moída de pneus.

O ligante de asfalto-borracha utilizado foi um CAP-20 modificado por 15% de borracha moída de pneus, fornecido pela GRECA Asfaltos (Araucária/PR).

As principais características do ligante asfáltico CAP-50/60 utilizado na pesquisa são apresentadas na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 – Características do ligante asfáltico CAP-50/60 utilizado.*

Propriedades	Resultados
Viscosidade a 60°C, máx, cP	3273
Penetração a 25°C (100g, 5s), 0,1mm	54
Ponto de amolecimento, °C	53
Índice de suscetibilidade térmica	-0,3
Poder de rigidificação, °C	68

* Valores fornecidos pelo fabricante.

Quando o ligante asfáltico CAP-50/60 foi modificado por 2% de polímeros Eastman EE-2, se observou os seguintes dados:

- Conforme a norma NBR 6560 (1985), para o ensaio de ponto de amolecimento (método do anel e bola), constatou-se uma temperatura de 54°C. Quando o ligante foi modificado por polímeros Eastman EE-2, a temperatura do ponto de amolecimento passou para 63°C; e,
- A viscosidade Saybolt Furol, regida pela norma DNER-ME 004/94 (1994), para o ligante puro e para o ligante modificado com 2% de polímeros Eastman EE-2, é apresentada na Tabela 3.3 e sua curva Viscosidade Saybolt Furol /Temperatura na Figura 3.2.

TABELA 3.3 – Viscosidade Saybolt Furol do CAP-50/60 e CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2.

	CAP-50/60	CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2
Temperatura (°C)	Viscosidade Saybolt Furol (s)	Viscosidade Saybolt Furol (s)
135	269	408
149	163	260
163	96	107

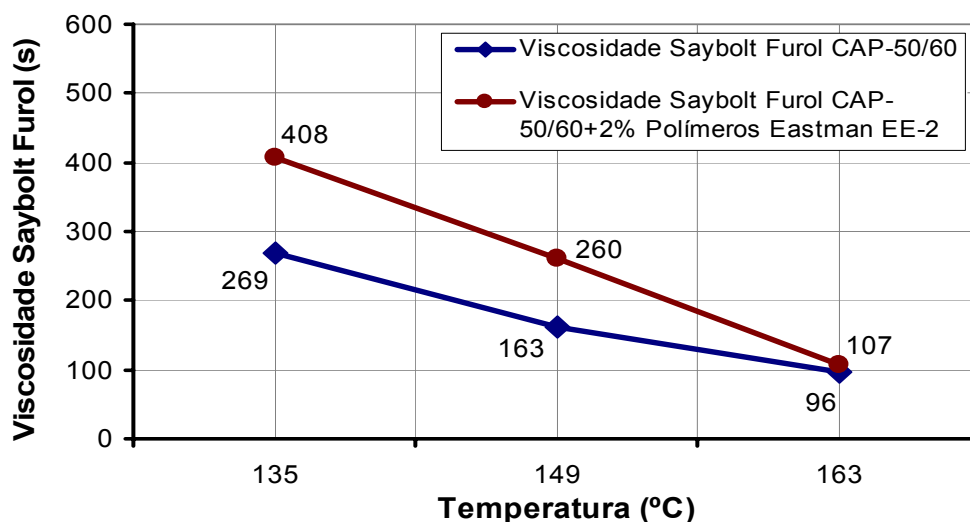


FIGURA 3.2 – Viscosidade Saybolt Furol CAP-50/60 e CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2.

O ensaio de penetração foi realizado segundo a norma DNER-ME 003/99 (1999), determinando-se a consistência do material com 54dmm. Quando o ligante foi modificado por polímeros Eastman EE-2, houve uma queda significativa na penetração, passando para 40dmm, ou seja, maior consistência.

Os resultados dos ensaios realizados com o ligante asfáltico tradicional CAP-20, antes de ser modificado, e o modificado por 15% com borracha moída de pneus, estão apresentados na Tabela 3.4.

TABELA 3.4 – Características do ligante asfáltico CAP-20 puro e asfalto-borracha.*

Ensaio	Norma	CAP-20	Asfalto-borracha
Viscosidade Brookfield a 135°C, (cP)	ASTM D 4402	348,3	3876,7
Viscosidade Brookfield a 155°C, (cP)	ASTM D 4402	139,2	1527,8
Viscosidade Brookfield a 175°C, (cP)	ASTM D 4402	66,8	704,2
Penetração, (0,1mm)	ASTM D 5	57,3	40,2
Ponto de Amolecimento, (°C)	ASTM D 36	47,2	60,2
Recuperação Elástica, (%)	DNER ME 382/99	3,7	67,2

* Valores fornecidos pelo fabricante.

3.1.3. Descrição dos modificadores utilizados

A incorporação de modificadores ao ligante asfáltico é dependente da preparação do ligante asfáltico base para receber a modificação. Para tanto, é necessário que o ligante asfáltico utilizado como matéria-prima tenha uma relação asfaltenos/aromáticos dentro de uma determinada faixa, de modo a assegurar a estabilidade à estocagem do produto final (FAXINA, 2002).

A seguir, são apresentadas, de forma específica, as características dos modificadores e incorporadores utilizados nas misturas de concretos asfálticos drenantes do trabalho.

3.1.4. Polímeros

O polímero utilizado nesta etapa da pesquisa, ilustrado conforme Figura 3.3, é especificado como polímeros Eastman EE-2, o qual é uma olefina modificada funcionalmente para altas temperaturas para asfaltos de rodovias. Foi empregado 2% de polímeros Eastman EE-2 em função do peso de ligante.



FIGURA 3.3 – Polímeros Eastman EE-2.

A olefina é um hidrocarboneto, sendo este, qualquer composto que contém exclusivamente em suas moléculas átomos de carbono e hidrogênio. Os hidrocarbonetos são classificados de acordo com a sua cadeia carbônica e a olefina é uma cadeia carbônica etênica, com uma ligação dupla ($\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$, 1-buteno).

A característica fundamental deste polímero é por ser responsável para associações polares dentro da estrutura molecular do asfalto. Apresenta dentre suas vantagens (INFORMAÇÃO TÉCNICA EASTMAN, 2001):

- Facilidade de mistura com o ligante;
- Compatibilidade com uma larga escala de asfaltos;
- Tem boa maleabilidade;
- Possui baixa viscosidade;
- Excelente estabilidade de armazenamento;
- Facilidade de manuseio; e
- Pode ser misturado com outros modificadores.

As características técnicas dos polímeros Eastman EE-2 são apresentadas na Tabela 3.5 (INFORMAÇÃO TÉCNICA EASTMAN (2001)).

TABELA 3.5 – Características técnicas dos polímeros Eastman EE-2.

Características Típicas dos polímeros Eastman EE-2	
Ponto de amolecimento, °C	111
Dureza, dmm	<0,5
Densidade, a 25°C	0,96
Viscosidade a 125°C, cP (mPa.s)	1500

3.1.5. Asfalto-borracha

O asfalto-borracha utilizado foi pré-misturado industrialmente, sendo este, composto por um ligante de CAP-20 e modificado com 15% de borracha moída de pneus em relação ao peso de ligante.

A composição aproximada da borracha moída de pneus utilizada é apresentada conforme segue na Tabela 3.6.

TABELA 3.6 – Composição química da borracha moída de pneus*.

Composto	Participação (%)	Variação possível (%)
Acetona	10	+/-4
Teor de cinzas	18	+/- 4
Negro de fumo	26	+/- 4
Teor de borracha	46	+/- 4

* Valores fornecidos pelo fabricante.

3.1.6. Fibras de celulose

As fibras de celulose não são modificadores de mistura asfáltica, mas, incorporadas a ela. Estas fibras (Figura 3.4), são recobertas com asfalto por um processo especial que auxilia na peletização do mesmo – a peletização é um processo de recobrimento de sementes, utilizando material inerte com o objetivo de facilitar a manipulação, através da homogeneização de tamanho e forma e/ou tratamento. As forças que agem sobre as fibras durante o processo de peletização são constantemente checadas. Ao mesmo tempo, o asfalto ocupa os espaços funcionais entre as fibras, necessário para a completa dispersão dos grãos durante o processo de usinagem com os agregados (CATÁLOGO VIATOP, 2003).

**FIGURA 3.4** – Fibras de celulose.

A percentagem de fibras de celulose incorporada na mistura foi de 0,3% em função do peso total da mesma. Para procedimento e preparação dos corpos-de-prova com as fibras de celulose adotou-se especificações conforme INFORMAÇÃO TÉCNICA VIATOP (2003a; 2003b).

Deve ser observado que não se devem colocar as fibras de celulose sem aquecimento na mistura, devido à baixa força de cisalhamento da mistura, ocasionando problemas de dissolução do ligante com as fibras de celulose (INFORMAÇÃO TÉCNICA VIATOP, 2003a, 2003b).

3.1.7. Cal

A cal também não se trata de um agente modificador, ela é adicionada à mistura asfáltica. A influência da cal hidratada quando adicionada a uma mistura asfáltica é conhecida como um poderoso agente melhorador de adesividade, em se falando de um filer ativo como a cal. Por outro lado, ocorre a formação de um mástique extremamente viscoso entre a cal e o ligante que pode alterar a reologia do ligante asfáltico.

A cal utilizada foi do tipo hidratada CH-III – dolomítica, enquadrada segundo especificação técnica NBR 7175 (2002) – em 2% em relação ao peso dos agregados miúdos (pó-de-brita), passante nas peneiras de 0,3mm, 0,15mm e 0,074mm.

Tanto nos corpos-de-prova Marshall de laboratório como nas placas para os ensaios de deformação permanente, para as misturas com fibras de celulose, foi utilizada a cal hidratada como elemento melhorador de adesividade.

3.2. Definição da Composição Granulométrica

Nos concretos asfálticos convencionais a granulometria dos agregados e a percentagem de CAP e suas características reológicas são os maiores responsáveis pelas características físicas e mecânicas adquiridas pela mistura. Nos concretos asfálticos drenantes, estes fatores passam a ter uma influência ainda maior, pois, este tipo de mistura possui uma constituição mais frágil e necessita de controle de características adicionais, como permeabilidade e percentagem de vazios comunicantes.

A característica drenante deste tipo de mistura depende fundamentalmente dos agregados, tanto graúdo (brita e pedrisco) quanto miúdo (pó-de-brita, areia, cal e filer).

Para as misturas de concretos asfálticos drenantes estudadas, foram concebidas duas composições granulométricas, sendo elas, no tamanho máximo de $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$ e a outra de $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$, visando reproduzir as mesmas curvas granulométricas utilizadas no estudo de MEURER FILHO (2001), conforme visto na Figura 2.13, página 25.

A seguir são apresentadas as percentagens passantes das composições granulométricas (Tabela 3.7 e 3.8) e as curvas granulométricas adotadas (Figura 3.5 e 3.6).

TABELA 3.7 – Composição granulométrica passante da curva adotada para granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

Peneiras (mm)	Percentagem Passante (%)
9,50	100
6,30	37,80
4,80	7,92
2,38	7,92
1,18	7,92
0,63	7,92
0,30	7,92
0,15	4,16
0,074	2,16

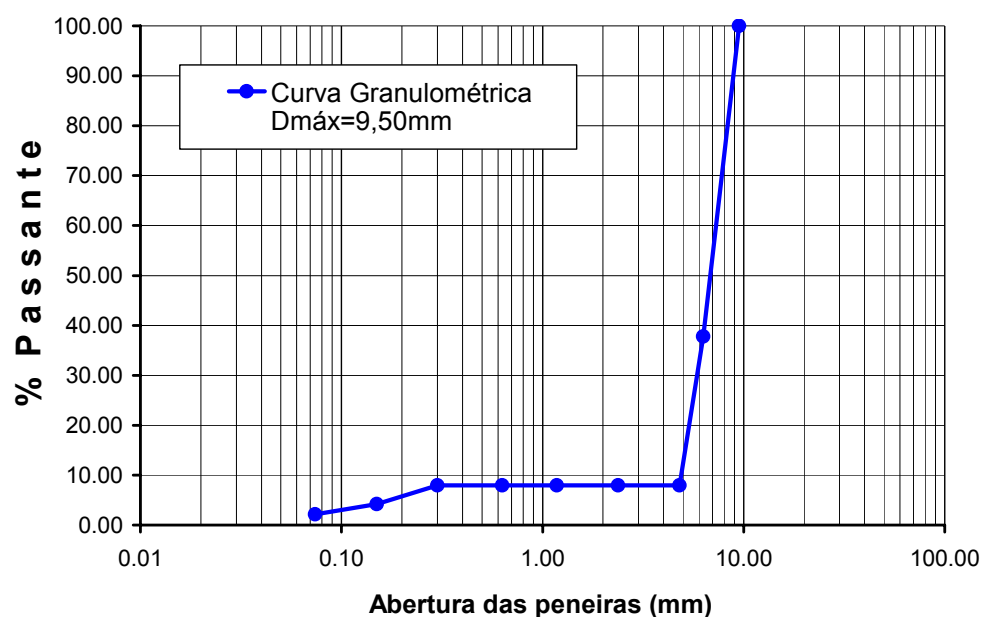


FIGURA 3.5 – Curva granulométrica G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

TABELA 3.8 – Composição granulométrica passante da curva adotada para granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

Peneiras (mm)	Percentagem Passante (%)
12,50	100
9,50	56,47
6,30	7,97
4,80	7,97
2,38	7,97
1,18	7,97
0,63	7,97
0,30	7,97
0,15	4,36
0,074	2,36

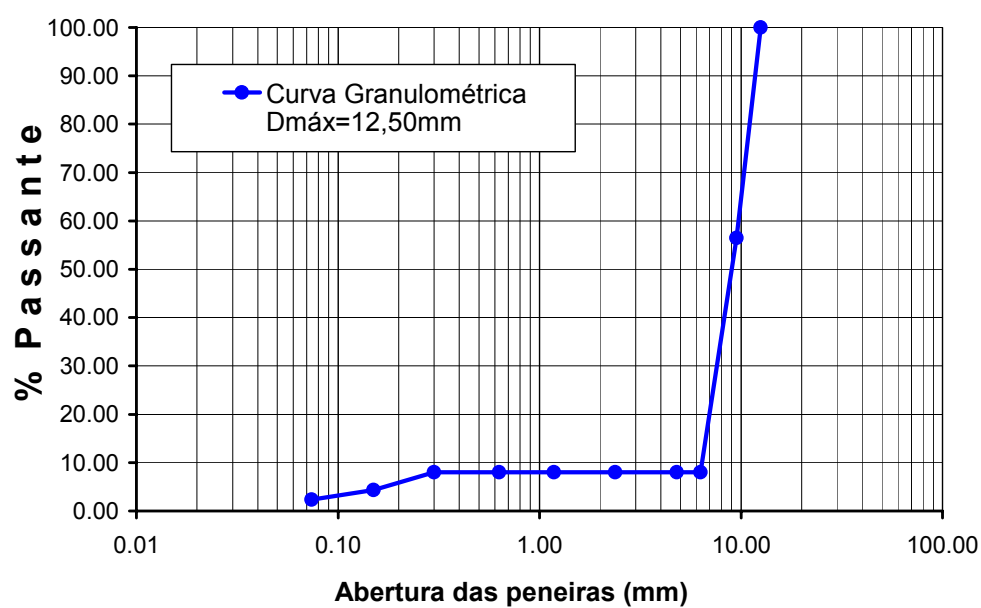


FIGURA 3.6 – Curva granulométrica G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

CAPÍTULO 4 – PROCEDIMENTOS DE LABORATÓRIO E RESULTADOS OBTIDOS

Foram moldados corpos-de-prova pelo processo Marshall para cada uma das granulometrias adotadas, para a determinação dos vazios, vazios comunicantes, permeabilidade, resistência à tração por compressão diametral, estabilidade e fluência e a análise da resistência à desagregação no ensaio Cântabro.

Em outra etapa da pesquisa, analisou-se a resistência à deformação permanente e a permeabilidade em placas de concreto asfáltico moldadas para esse fim.

O teor de ligante para cada mistura estudada foi adotado com base em experiências internacionais, principalmente dos países europeus (conforme apresentado na Tabela 2.1, página 29), e referências de pesquisadores bem conceituados no assunto, como RUIZ (1997), NICHOLLS (1997), SWART (1997), HEYSTRÆTEN e MORAUX (1990), ISENRING *et al.* (1990), RUIZ *et al.* (1990), PÉREZ-JIMÉNEZ e GORDILLO (1990) e MORAUX (1989). Sendo então, adotado a seguinte média de teores:

- Ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2: 4% $\pm 0,5$;
- Ligante asfáltico de asfalto-borracha: 4,5% $\pm 0,5$; e,
- Ligante asfáltico com fibras de celulose: 4,5% $\pm 0,7$.

A relação da quantidade de corpos-de-prova nas duas granulometrias, necessários para a execução dos ensaios para as misturas de concretos asfálticos drenantes estudadas é apresentada na Tabela 4.1 para moldes Marshall e na Tabela 4.2 para moldes em placas.

TABELA 4.1 – Quantidade de corpos-de-prova moldes Marshall para os ensaios executados em função de cada uma das misturas estudadas.

Corpos-de-prova moldes Marshall para execução dos ensaios							
Mistura	Granulometria G1 (D _{máx} =9,50mm)			Granulometria G2 (D _{máx} =12,50mm)			Quantidades de corpos-de-prova
Asfalto-Borracha	4%	4,5%	5%	4%	4,5%	5%	
CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2	3,5%	4%	4,5%	3,5%	4%	4,5%	
CAP-50/60+0,3% Fibras de celulose	3,8%	4,5%	5,2%	3,8%	4,5%	5,2%	
Ensaios nos Corpos-de-Prova Não-Destrutivos							
Vazios	16	16	16	16	16	16	96
Vazios Comunicantes	16	16	16	16	16	16	
Permeabilidade	16	16	16	16	16	16	
Ensaios nos Corpos-de-Prova Destrutivos (são utilizados os mesmos CP's dos ensaios não-destrutivos)							
Marshall	4	4	4	4	4	4	24
Cântabro Seco	4	4	4	4	4	4	24
Cântabro Úmido	4	4	4	4	4	4	24
Tração Indireta	4	4	4	4	4	4	24
Total de corpos-de-prova (para cada uma das misturas estudadas)							96

TABELA 4.2 – Quantidade de placas moldadas com a granulometria G2 (D_{máx}=12,50mm).

Mistura	Granulometria G2 (D _{máx} =12,50mm)	Quantidades de corpos-de- prova
Asfalto-Borracha	5,0%	
CAP-50/60+2% Polímeros Eastman EE-2	4,0%	
CAP-50/60+0,3% Fibras de celulose	4,5%	
Ensaio nas Placas (para cada uma das misturas estudadas)		
Permeabilidade	2	2
Deformação Permanente (são utilizadas as mesmas placas do ensaio de permeabilidade)	2	
Total de placas		6

O conjunto de ensaios da pesquisa foi elaborado conforme o esquema da Tabela 4.1, com a confecção de 32 corpos-de-prova moldes Marshall para cada uma das duas granulometrias adotadas, com três teores de ligantes asfálticos diferentes, totalizando 96 corpos-de-prova para cada mistura estudada. Após a realização dos ensaios e a obtenção dos resultados, foi determinado o teor ótimo (conforme Capítulo 5 - Análise dos Resultados).

Quanto às placas, foram confeccionadas duas para cada mistura, moldadas no teor ótimo de ligante com a granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$). A granulometria foi adotada em função da análise do ensaio de desagregação, que obteve para esta, os menores valores.

4.1. Moldagem dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova foram confeccionados segundo a metodologia Marshall, conforme norma DNER-043/95 (1995) para misturas asfálticas. As temperaturas para moldagem dos corpos-de-prova seguem as especificações de temperatura determinadas de acordo com a viscosidade do cimento asfáltico, conforme Tabela 4.3.

TABELA 4.3 – Temperaturas para moldagem dos corpos-de-prova.*

ESPECIFICAÇÕES	LIGANTES ASFÁLTICOS UTILIZADOS	
	CAP-20	CAP 50/60
Temperatura do agregado (°C)	168	175
Temperatura do ligante (°C)	158	170
Temperatura de compactação (°C)	147	150

* Valores fornecidos pelo fabricante.

A mistura foi realizada homogeneizando os agregados graúdos, em seguida, a adição do ligante. Após a homogeneização do ligante com os agregados graúdos foram então adicionados os agregados miúdos e pulverulentos. Esse procedimento permite que o ligante envolva melhor o agregado mais graúdo. No caso da mistura com fibras de celulose, a cal foi adicionada por último, com o intuito de melhorar as propriedades de viscosidade do material.

O procedimento de compactação é o especificado pela norma DNER-ME 043/95 (1995) para o ensaio Marshall padrão, com aplicação de 50 golpes em cada face. Por ser uma mistura aberta, ocorre o esmagamento dos agregados com aplicações de maior número de golpes na compactação. Tal especificação é de experiência internacional, donde foram condicionados e estabelecidos a um conjunto de especificações técnicas (BOLZAN, 2000b, 2000c). Alguns dos corpos-de-prova confeccionados para a realização dos ensaios são apresentados na Figura 4.1.



FIGURA 4.1 – Corpos-de-prova Marshall confeccionados para um tipo de mistura ensaiada.

4.2. Ensaaios Realizados

Os ensaios de maior importância para a concepção das misturas estudadas são desgaste Cântabro, permeabilidade e deformação permanente. Contudo, foram realizados ainda, os ensaios de estabilidade e fluência Marshall e ensaios de resistência à tração indireta, estes, por sua vez, com sistema de aquisição de dados por computador. A seguir, são apresentados de forma detalhada os métodos, procedimentos e ensaios de laboratório realizados na pesquisa para todas as misturas estudadas.

4.2.1. Ensaio de percentagem de vazios

É determinado através de cálculos onde a densidade teórica máxima do material e sua densidade aparente. Com o conhecimento dessas densidades, a percentagem de vazios pode ser determinada pela seguinte equação:

$$V_v = \frac{D_t - d}{D_t} \cdot 100 \quad (4.1)$$

onde:

V_v – Volume de vazios, em %;

D_t – Densidade teórica máxima da mistura; e,

d – Densidade aparente da mistura.

A determinação da densidade aparente dos corpos-de-prova foi feita envolvendo-os em fita adesiva e uma película de parafina, seguindo método de ensaio DNER-ME 117/94. Quanto às densidades aparentes utilizadas, tanto para o ligante asfáltico CAP-50/60, asfalto-borracha, fita adesiva e para a parafina, são, respectivamente, 1,028, 1,034, 0,97 e 0,89, sendo obtidas pelos fabricantes dos mesmos. A densidade aparente das misturas estudadas foi determinada através da seguinte equação:

$$d = \frac{m_a}{m_p - m_i - \left[\frac{(m_p - m_a)}{D_p} \right]} \quad (4.2)$$

onde:

d – Densidade aparente da mistura;

m_a – Massa da amostra ao ar, em g;

m_p – Massa da amostra parafinada ao ar, g;

m_i – Massa da amostra parafinada imersa em água, em g; e,

D_p – Densidade da parafina.

4.2.2. Ensaio de percentagem de vazios comunicantes

O ensaio para a determinação dos vazios comunicantes é de grande importância para a verificação da eficácia da mistura no que diz respeito à permeabilidade, pois mede o índice de vazios dos poros contínuos que contribui para a percolação da água.

Consiste em medir a quantidade de água que penetra no interior do corpo-de-prova pela face superior enquanto as faces lateral e inferior são impermeabilizadas por fita adesiva impermeável e parafina, mantendo-se em sua face superior uma película constante de água durante dez minutos (AFNOR-NF-P-98-254-2, 1993).

A percentagem de vazios comunicantes é obtida através da expressão:

$$V_{vc} = \frac{P}{A_{CP} \cdot h_{reduzida}} \cdot 100 \quad (4.3)$$

onde:

V_{vc} – Percentagem de vazios comunicantes, em %;

P – Diferença entre peso do corpo-de-prova cheio de água e seco, em g;

A_{CP} – Área da face inferior ou superior do corpo-de-prova, em cm^2 ; e,

$h_{reduzida}$ – calculada pela equação 4.4, conforme abaixo:

$$h_{reduzida} = h_{média} - \frac{D.máx}{20} \quad (4.4)$$

onde:

$D_{máx}$ – Diâmetro máximo do maior agregado utilizado na mistura, em cm;

$h_{média}$ – Média entre três medidas de altura do corpo-de-prova, em cm;

$h_{reduzida}$ – Altura reduzida, em cm; e,

20 – Constante de norma.

O método de moldagem dos corpos-de-prova confeccionados para o ensaio de determinação do índice de percentagem dos vazios comunicantes é ilustrado na Figura 4.2.

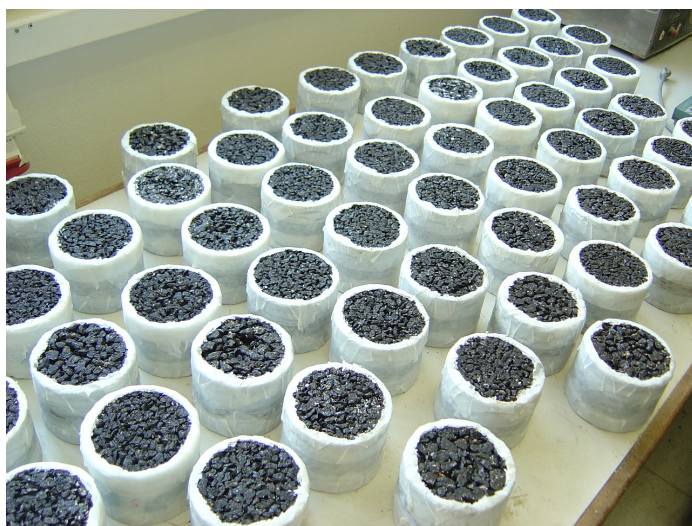


FIGURA 4.2 – Moldagem dos corpos-de-prova para determinação do índice de vazios comunicantes.

4.2.3. Ensaio de permeabilidade nos corpos-de-prova Marshall

Para a realização do ensaio de permeabilidade, foi utilizado um equipamento próprio para este fim, conforme ilustra a Figura 4.3. O princípio do ensaio consiste em vedar lateralmente o corpo-de-prova (com parafina ou silicone, para que a vazão ocorra somente na direção vertical) e medir o tempo que leva para determinada quantidade de água atravessar o corpo-de-prova. Sendo dado enfoque ao fluxo de escoamento da percolação de água através do corpo-de-prova, com carga hidráulica variável, o valor é obtido através da expressão:

$$V = \frac{H_{tubo}}{T_{percolação}} \quad (4.5)$$

onde:

V – Fluxo de escoamento d'água através do corpo-de-prova, em cm/s;

H_{tubo} – Distância entre os dois meniscos, 25cm; e,

$T_{percolação}$ – Tempo de percolação da água, em s.



FIGURA 4.3 – Ensaio de permeabilidade nos corpos-de-prova Marshall.

4.2.4. Ensaio Cântabro

O ensaio Cântabro foi desenvolvido na Universidade da Catalúnia (Espanha) com a finalidade de avaliar a perda por desgaste da camada de rolamento. O ensaio está de acordo com a especificação brasileira DNER-ME 383/99 (1999).

O ensaio é realizado submetendo-se os corpos-de-prova a 300 revoluções no tambor de abrasão Los Angeles sem as esferas metálicas, à velocidade de 30rpm a 33rpm. Verifica-se a quantidade de massa que o corpo-de-prova perde no processo e o resultado é dado em percentagem de perda de peso através da seguinte equação:

$$Pp = \frac{P_i - P_f}{P_i} \cdot 100 \quad (4.6)$$

onde:

Pp – Percentagem de perda do corpo-de-prova, em %;

P_i – Peso inicial do corpo-de-prova, em g; e,

P_f – Peso final do corpo-de-prova, em g.

Segundo a norma DNER-ME 383/99 (1999), o desgaste para cada teor de ligante asfáltico deve ser a média aritmética de três ensaios, com o valor individual não diferindo de $\pm 20\%$ do valor médio.

O ensaio Cântabro foi realizado em duas diferentes condições, numa o corpo-de-prova era mantido a 25°C e ensaiado seco, e na outra, o corpo-de-prova era imerso em água a 60°C e ensaiado (neste caso o corpo-de-prova permanece durante 24 horas antes de ser ensaiado para manter constância de temperatura).

4.2.5. Ensaio de estabilidade e fluência Marshall

O ensaio de determinação da estabilidade e fluência Marshall foi regido segundo os procedimentos recomendados pelo método de ensaio DNER-ME 043/95 (1995).

O comportamento de uma mistura drenante é diferente de uma mistura densa convencional, e, torna-se difícil avaliar a fluência da mistura por meio do ensaio Marshall. Apesar disso, segundo a ASSOCIAÇÃO DAS RODOVIAS DO JAPÃO (1996), em boa parte dos pavimentos drenantes no país foi especificado no projeto de dosagem um valor de estabilidade Marshall mínimo (3.500N), e na maioria dos casos os revestimentos drenantes têm apresentado boa durabilidade.

As medidas foram obtidas com o auxílio de uma aparelhagem especial que realiza a transferência de dados da prensa mecânica para um computador que estava equipado com um software apropriado para fazer as leituras (Figura 4.4).

Esse sistema de medição de deformação da amostra é composto por dispositivo mecânico-eletromagnéticos do tipo LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*), que são conectados a um módulo condicionador de sinais analógicos. Este módulo condicionador é conectado a um computador que registra os deslocamentos através do programa de aquisição de dados.



FIGURA 4.4 – Equipamento usado para a realização do ensaio de estabilidade e fluência Marshall.

4.2.6. Ensaio de tração indireta por compressão diametral

O ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral das misturas seguiu os procedimentos descritos no método de ensaio DNER-ME 138/94 (1994).

O ensaio de resistência à tração foi realizado em duas diferentes condições, numa o corpo-de-prova era mantido a 25°C e ensaiado seco, e na outra, o corpo-de-prova era imerso em água a 60°C (condição mais severa) e ensaiado (neste caso o corpo-de-prova permanece durante 1 hora antes de ser ensaiado para manter constância de temperatura).

4.2.7. Resultado dos ensaios

Os resultados dos ensaios realizados, que gerou também a avaliação e a determinação do teor ótimo de ligante para cada mistura modificada estudada, e também para a compactação das placas, são apresentados a seguir, nas Tabelas 4.4 à 4.9.

As tabelas apresentam de forma sucinta e detalhada todos os ensaios realizados com seus respectivos resultados, em função de cada teor de ligante utilizado para as duas granulometrias adotadas.

A determinação do teor ótimo de ligante é avaliada através dos índices de vazios e vazios comunicantes, da permeabilidade e do desgaste por abrasão no ensaio Cântabro.

TABELA 4.4 – Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2 – Granulometria 1 – $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$.

Ligante Asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2										
Granulometria 1 - $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$										
CP	Teor de ligante (%)	Vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Permeabilidade (cm/s)	Perdas Cântabro Seco (%)	Perdas Cântabro Úmido (%)	Estabilidade Marshall (N)	Fluência Marshall (mm)	Tração Indireta Seco (MPa)	Tração Indireta Úmido (MPa)
1	3.5	26.34	22.60	4.76	89.03	-	-	-	-	-
2		25.51	22.56	5.43	59.61	-	-	-	-	-
3		24.54	20.81	4.62	67.91	-	-	-	-	-
4		25.52	22.17	5.54	60.28	-	-	-	-	-
5		24.89	21.18	5.09	-	92.63	-	-	-	-
6		25.53	21.70	5.48	-	85.80	-	-	-	-
7		25.64	22.14	5.41	-	79.13	-	-	-	-
8		25.54	21.34	4.75	-	79.77	-	-	-	-
9		25.12	21.27	5.16	-	-	9550	2.05	-	-
10		23.15	20.03	3.96	-	-	7930	2.10	-	-
11		25.15	22.20	5.23	-	-	7002	1.49	-	-
12		25.95	22.26	5.52	-	-	6258	3.04	-	-
13		24.62	20.83	4.73	-	-	-	-	0.63	-
14		25.27	21.87	5.54	-	-	-	-	0.62	-
15		27.05	22.18	5.67	-	-	-	-	-	0.15
16		26.27	22.42	6.08	-	-	-	-	-	0.17
17	4.0	25.48	21.24	5.03	49.20	-	-	-	-	-
18		24.45	21.02	5.16	38.63	-	-	-	-	-
19		24.20	20.58	5.14	47.55	-	-	-	-	-
20		24.76	20.70	4.53	55.59	-	-	-	-	-
21		24.14	20.48	4.83	-	76.29	-	-	-	-
22		24.84	21.01	5.31	-	58.59	-	-	-	-
23		23.44	19.46	4.72	-	57.30	-	-	-	-
24		23.40	19.69	4.73	-	39.67	-	-	-	-
25		23.30	18.76	4.31	-	-	7663	1.89	-	-
26		23.73	19.46	4.19	-	-	8021	1.94	-	-
27		25.07	21.74	5.41	-	-	9158	1.93	-	-
28		24.02	19.31	4.50	-	-	8457	0.96	-	-
29		25.17	21.49	4.88	-	-	-	-	0.70	-
30		25.46	20.93	5.23	-	-	-	-	0.73	-
31		25.66	21.74	5.86	-	-	-	-	-	0.30
32		22.47	18.18	3.59	-	-	-	-	-	0.23
33	4.5	22.82	18.66	3.88	33.71	-	-	-	-	-
34		21.66	18.03	3.83	31.18	-	-	-	-	-
35		24.00	19.78	5.13	45.14	-	-	-	-	-
36		21.64	18.15	3.49	32.79	-	-	-	-	-
37		23.65	20.01	4.99	-	47.95	-	-	-	-
38		22.13	17.90	4.49	-	48.59	-	-	-	-
39		22.93	19.74	4.78	-	41.17	-	-	-	-
40		22.20	19.04	4.48	-	58.63	-	-	-	-
41		24.45	20.62	5.02	-	-	8056	2.78	-	-
42		22.71	19.18	4.00	-	-	9061	1.84	-	-
43		22.70	18.54	4.09	-	-	9332	1.91	-	-
44		23.35	19.43	4.38	-	-	9474	1.25	-	-
45		22.59	18.03	4.70	-	-	-	-	0.80	-
46		22.71	18.26	4.92	-	-	-	-	0.77	-
47		21.83	17.81	4.65	-	-	-	-	-	0.17
48		23.03	18.85	4.76	-	-	-	-	-	0.19

TABELA 4.5 – Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2 – Granulometria 2 – $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$.

Ligante Asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2										
Granulometria 2 - $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$										
CP	Teor de ligante (%)	Vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Permeabilidade (cm/s)	Perdas Cântabro Seco (%)	Perdas Cântabro Úmido (%)	Estabilidade Marshall (N)	Fluência Marshall (mm)	Tração Indireta Seco (MPa)	Tração Indireta Úmido (MPa)
49	3.5	27.72	23.47	7.78	100.00	-	-	-	-	-
50		25.85	20.92	6.06	98.90	-	-	-	-	-
51		27.15	22.98	7.19	67.78	-	-	-	-	-
52		27.46	23.15	7.43	83.16	-	-	-	-	-
53		26.60	22.09	6.88	-	100.00	-	-	-	-
54		26.87	22.45	7.08	-	100.00	-	-	-	-
55		25.34	19.87	5.79	-	100.00	-	-	-	-
56		25.43	20.37	5.88	-	100.00	-	-	-	-
57		25.78	20.96	5.26	-	-	8929	2.36	-	-
58		26.17	21.55	6.39	-	-	8687	2.66	-	-
59		25.79	21.12	6.40	-	-	8949	2.20	-	-
60		27.00	22.44	6.97	-	-	6959	3.00	-	-
61		27.05	21.42	5.86	-	-	-	-	0.60	-
62		26.81	21.34	6.21	-	-	-	-	0.49	-
63		26.80	20.61	5.83	-	-	-	-	-	0.19
64		25.30	19.24	4.96	-	-	-	-	-	0.18
65	4.0	24.24	19.49	5.56	62.78	-	-	-	-	-
66		24.49	18.62	5.21	54.96	-	-	-	-	-
67		24.45	18.97	5.70	60.05	-	-	-	-	-
68		25.28	19.24	5.49	53.59	-	-	-	-	-
69		25.27	19.27	5.03	-	99.10	-	-	-	-
70		26.56	21.18	6.24	-	98.13	-	-	-	-
71		25.11	16.96	4.63	-	39.48	-	-	-	-
72		24.15	18.78	5.49	-	67.13	-	-	-	-
73		24.05	16.62	4.03	-	-	8583	3.20	-	-
74		25.30	18.65	5.06	-	-	8325	2.43	-	-
75		26.48	21.64	6.37	-	-	8004	2.38	-	-
76		25.93	20.48	6.38	-	-	8579	6.18	-	-
77		25.43	18.70	5.54	-	-	-	-	0.71	-
78		24.19	18.40	5.19	-	-	-	-	0.67	-
79		24.18	17.42	4.77	-	-	-	-	-	0.16
80		22.24	15.99	3.98	-	-	-	-	-	0.19
81	4.5	23.89	18.37	4.95	23.69	-	-	-	-	-
82		23.86	18.00	4.80	22.51	-	-	-	-	-
83		22.45	15.89	3.89	25.37	-	-	-	-	-
84		23.07	16.67	4.47	36.31	-	-	-	-	-
85		23.86	19.06	5.04	-	51.11	-	-	-	-
86		23.35	16.37	3.87	-	45.41	-	-	-	-
87		22.49	16.67	3.67	-	41.98	-	-	-	-
88		22.19	12.88	3.64	-	55.20	-	-	-	-
89		22.86	15.17	3.85	-	-	8463	5.57	-	-
90		22.32	17.93	5.40	-	-	8471	3.73	-	-
91		22.45	15.03	3.72	-	-	8289	3.29	-	-
92		23.32	16.58	4.00	-	-	8561	3.20	-	-
93		21.89	14.43	3.80	-	-	-	-	0.68	-
94		21.76	15.36	3.99	-	-	-	-	0.64	-
95		22.50	16.60	3.77	-	-	-	-	-	0.22
96		26.29	17.69	4.82	-	-	-	-	-	0.19

TABELA 4.6 – Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico de asfalto-borracha – Granulometria 1 – $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$.

Ligante Asfáltico de asfalto-borracha										
Granulometria 1 - $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$										
CP	Teor de ligante (%)	Vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Permeabilidade (cm/s)	Perdas Cântabro Seco (%)	Perdas Cântabro Úmido (%)	Estabilidade Marshall (N)	Fluência Marshall (mm)	Tração Indireta Seco (MPa)	Tração Indireta Úmido (MPa)
1	4.0	22.11	16.79	0.91	44.84	-	-	-	-	-
2		23.68	17.10	0.93	47.95	-	-	-	-	-
3		23.84	14.08	0.87	96.09	-	-	-	-	-
4		23.69	15.67	0.94	88.61	-	-	-	-	-
5		23.79	16.25	1.03	-	48.90	-	-	-	-
6		21.74	13.07	0.74	-	38.39	-	-	-	-
7		23.45	13.63	0.87	-	100.00	-	-	-	-
8		22.62	13.32	0.77	-	100.00	-	-	-	-
9		23.62	15.94	0.92	-	-	12851	5.87	-	-
10		22.92	13.30	0.83	-	-	10212	7.36	-	-
11		22.51	12.66	0.74	-	-	11256	4.76	-	-
12		23.75	15.62	0.94	-	-	7350	2.54	-	-
13		23.46	14.47	0.84	-	-	-	-	0.34	-
14		23.88	14.97	0.88	-	-	-	-	0.39	-
15		23.15	16.90	0.80	-	-	-	-	-	0.25
16		23.48	15.48	0.84	-	-	-	-	-	0.15
17	4.5	21.43	15.80	0.80	32.85	-	-	-	-	-
18		22.18	16.64	0.99	33.13	-	-	-	-	-
19		22.21	15.32	0.89	33.76	-	-	-	-	-
20		22.35	16.50	0.87	34.72	-	-	-	-	-
21		22.40	17.72	0.98	-	39.19	-	-	-	-
22		22.65	17.39	1.04	-	40.96	-	-	-	-
23		21.53	16.48	0.92	-	35.39	-	-	-	-
24		22.48	16.99	0.91	-	35.87	-	-	-	-
25		23.04	17.00	0.95	-	-	9355	4.44	-	-
26		21.99	15.39	0.78	-	-	8492	4.06	-	-
27		22.55	16.63	0.97	-	-	10027	3.33	-	-
28		20.98	16.17	0.84	-	-	11294	7.33	-	-
29		21.34	15.71	0.87	-	-	-	-	0.67	-
30		22.31	17.54	1.06	-	-	-	-	0.67	-
31		22.53	16.50	0.91	-	-	-	-	-	0.21
32		21.84	15.45	0.83	-	-	-	-	-	0.26
33	5.0	21.63	16.70	0.92	30.50	-	-	-	-	-
34		20.87	13.93	0.78	25.97	-	-	-	-	-
35		20.89	14.83	0.71	21.48	-	-	-	-	-
36		20.18	14.10	0.64	18.48	-	-	-	-	-
37		21.77	15.97	0.86	-	23.46	-	-	-	-
38		20.63	16.21	0.80	-	14.43	-	-	-	-
39		21.35	15.63	0.83	-	17.20	-	-	-	-
40		20.32	14.18	0.68	-	16.77	-	-	-	-
41		21.05	15.51	0.86	-	-	12644	5.95	-	-
42		20.65	14.94	0.72	-	-	13538	1.02	-	-
43		21.32	15.87	0.77	-	-	12003	2.79	-	-
44		20.70	15.51	0.77	-	-	12933	3.30	-	-
45		20.90	15.01	0.66	-	-	-	-	0.76	-
46		21.08	15.40	0.81	-	-	-	-	0.80	-
47		21.60	16.22	0.93	-	-	-	-	-	0.19
48		21.49	16.08	0.86	-	-	-	-	-	0.24

TABELA 4.7 – Resultado dos ensaios das misturas com ligante asfáltico de asfalto-borracha – Granulometria 2 – $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$.

Ligante Asfáltico de asfalto-borracha										
Granulometria 2 - $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$										
CP	Teor de ligante (%)	Vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Permeabilidade (cm/s)	Perdas Cântabro Seco (%)	Perdas Cântabro Úmido (%)	Estabilidade Marshall (N)	Fluência Marshall (mm)	Tração Indireta Seco (MPa)	Tração Indireta Úmido (MPa)
49	4.0	21.06	15.87	0.83	39.08	-	-	-	-	-
50		23.80	16.31	1.00	98.12	-	-	-	-	-
51		22.86	14.56	0.90	98.43	-	-	-	-	-
52		23.01	15.88	0.97	91.81	-	-	-	-	-
53		22.87	14.99	0.86	-	100.00	-	-	-	-
54		23.50	15.94	1.11	-	100.00	-	-	-	-
55		23.76	16.85	0.98	-	100.00	-	-	-	-
56		22.92	13.88	0.90	-	100.00	-	-	-	-
57		23.70	16.39	1.03	-	-	10871	0.00	-	-
58		23.62	18.02	0.94	-	-	9661	2.79	-	-
59		22.32	17.24	1.00	-	-	9122	2.38	-	-
60		22.94	14.23	0.95	-	-	10102	2.66	-	-
61		21.80	13.48	0.68	-	-	-	-	0.43	-
62		24.33	18.58	1.08	-	-	-	-	0.45	-
63		24.42	18.65	1.22	-	-	-	-	-	0.28
64		23.25	16.48	0.87	-	-	-	-	-	0.18
65	4.5	22.53	18.32	0.99	39.87	-	-	-	-	-
66		22.57	17.58	1.08	36.35	-	-	-	-	-
67		21.41	16.82	0.95	29.80	-	-	-	-	-
68		24.10	19.69	1.74	54.77	-	-	-	-	-
69		19.94	15.55	0.89	-	28.34	-	-	-	-
70		22.26	16.93	1.16	-	31.62	-	-	-	-
71		22.19	17.51	1.05	-	36.59	-	-	-	-
72		23.02	17.46	1.28	-	30.06	-	-	-	-
73		21.15	15.95	1.09	-	-	10566	4.82	-	-
74		22.24	15.67	1.05	-	-	10864	5.33	-	-
75		21.23	15.89	0.92	-	-	9887	2.66	-	-
76		21.65	15.92	0.95	-	-	11518	9.12	-	-
77		21.98	16.10	1.09	-	-	-	-	0.74	-
78		21.60	15.56	1.00	-	-	-	-	0.66	-
79		22.38	17.30	1.20	-	-	-	-	-	0.19
80		21.84	16.59	1.16	-	-	-	-	-	0.18
81	5.0	21.04	13.99	1.00	25.93	-	-	-	-	-
82		20.36	13.99	0.85	20.37	-	-	-	-	-
83		20.21	15.24	0.90	23.34	-	-	-	-	-
84		21.60	16.34	0.98	40.29	-	-	-	-	-
85		20.21	14.49	0.86	-	16.30	-	-	-	-
86		20.10	14.34	0.83	-	11.19	-	-	-	-
87		20.37	14.27	1.00	-	15.42	-	-	-	-
88		20.49	14.32	0.85	-	16.25	-	-	-	-
89		20.31	15.37	0.83	-	-	13261	5.55	-	-
90		20.29	14.99	0.84	-	-	13344	3.57	-	-
91		19.98	14.72	1.00	-	-	11557	1.78	-	-
92		21.04	14.84	0.82	-	-	12092	6.85	-	-
93		20.35	14.53	0.76	-	-	-	-	0.64	-
94		20.19	15.26	0.84	-	-	-	-	0.86	-
95		20.62	15.27	0.90	-	-	-	-	-	0.19
96		20.86	15.32	0.86	-	-	-	-	-	0.21

TABELA 4.8 – Resultado dos ensaios das misturas com fibras de celulose – Granulometria 1 –
 $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$.

Ligante Asfáltico com fibras de celulose										
Granulometria 1 - $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$										
CP	Teor de ligante (%)	Vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Permeabilidade (cm/s)	Perdas Cântabro Seco (%)	Perdas Cântabro Úmido (%)	Estabilidade Marshall (N)	Fluência Marshall (mm)	Tração Indireta Seco (MPa)	Tração Indireta Úmido (MPa)
1	3.8	25.17	23.28	5.39	46.19	-	-	-	-	-
2		23.86	21.59	5.06	47.05	-	-	-	-	-
3		23.87	21.62	5.30	36.46	-	-	-	-	-
4		22.49	20.06	4.52	55.76	-	-	-	-	-
5		23.15	20.71	4.06	-	99.54	-	-	-	-
6		23.38	21.67	4.96	-	100.00	-	-	-	-
7		23.57	20.82	5.14	-	99.77	-	-	-	-
8		24.19	22.29	5.67	-	99.96	-	-	-	-
9		25.17	22.13	5.67	-	-	6818	3.15	-	-
10		24.16	21.16	5.12	-	-	4000	3.36	-	-
11		24.84	21.26	4.97	-	-	5409	3.25	-	-
12		24.59	21.70	5.49	-	-	4705	3.31	-	-
13		23.50	20.35	4.97	-	-	-	-	0.36	-
14		22.69	18.80	4.32	-	-	-	-	0.39	-
15		23.76	20.34	4.79	-	-	-	-	-	0.02
16		24.45	20.88	5.31	-	-	-	-	-	0.04
17	4.5	23.13	19.42	4.69	23.77	-	-	-	-	-
18		23.20	19.32	4.52	22.33	-	-	-	-	-
19		22.66	20.25	4.33	24.47	-	-	-	-	-
20		23.15	19.51	4.00	23.89	-	-	-	-	-
21		26.70	22.20	4.92	-	99.64	-	-	-	-
22		22.86	19.95	4.73	-	97.65	-	-	-	-
23		22.92	20.43	4.79	-	98.38	-	-	-	-
24		24.20	23.48	4.73	-	98.99	-	-	-	-
25		21.68	19.85	4.17	-	-	4159	3.20	-	-
26		23.14	20.24	3.82	-	-	3813	3.17	-	-
27		23.14	20.51	4.20	-	-	3986	3.29	-	-
28		22.29	20.18	4.44	-	-	3899	3.23	-	-
29		23.36	16.40	4.22	-	-	-	-	0.40	-
30		24.14	20.57	4.68	-	-	-	-	0.42	-
31		22.40	19.82	3.95	-	-	-	-	-	0.21
32		22.66	19.52	4.24	-	-	-	-	-	0.03
33	5.2	21.08	20.51	3.87	22.17	-	-	-	-	-
34		21.52	19.01	4.10	17.48	-	-	-	-	-
35		23.32	20.29	4.07	17.95	-	-	-	-	-
36		22.81	18.71	3.57	19.20	-	-	-	-	-
37		22.94	19.40	3.59	-	99.69	-	-	-	-
38		21.79	19.16	3.30	-	99.34	-	-	-	-
39		22.51	19.16	3.94	-	99.52	-	-	-	-
40		23.64	19.23	3.33	-	99.43	-	-	-	-
41		23.59	20.95	4.10	-	-	3310	3.44	-	-
42		23.30	19.74	3.88	-	-	3689	3.43	-	-
43		24.29	22.32	4.55	-	-	3500	3.39	-	-
44		23.60	20.26	4.10	-	-	3594	3.41	-	-
45		23.98	21.78	4.59	-	-	-	-	0.45	-
46		23.50	21.15	4.28	-	-	-	-	0.43	-
47		23.20	19.95	3.61	-	-	-	-	-	0.02
48		23.17	19.48	3.64	-	-	-	-	-	0.03

TABELA 4.9 – Resultado dos ensaios das misturas com fibras de celulose – Granulometria 2 –
 $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$.

Ligante Asfáltico com fibras de celulose										
Granulometria 2 - $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$										
CP	Teor de ligante (%)	Vazios (%)	Vazios Comunicantes (%)	Permeabilidade (cm/s)	Perdas Cântabro Seco (%)	Perdas Cântabro Úmido (%)	Estabilidade Marshall (N)	Fluência Marshall (mm)	Tração Indireta Seco (MPa)	Tração Indireta Úmido (MPa)
49	3.8	25.57	22.50	6.37	62.05	-	-	-	-	-
50		25.47	22.35	6.28	73.60	-	-	-	-	-
51		24.76	21.67	5.83	62.12	-	-	-	-	-
52		25.08	22.81	6.06	65.92	-	-	-	-	-
53		24.41	21.85	5.49	-	99.70	-	-	-	-
54		24.10	22.72	6.11	-	97.85	-	-	-	-
55		26.18	23.90	7.07	-	98.78	-	-	-	-
56		25.20	22.80	5.77	-	98.31	-	-	-	-
57		25.52	21.51	5.14	-	-	4318	3.39	-	-
58		24.89	21.73	5.68	-	-	3348	5.06	-	-
59		24.65	21.64	5.66	-	-	4168	3.04	-	-
60		24.74	21.41	5.63	-	-	3945	3.83	-	-
61		24.57	21.99	5.77	-	-	-	-	0.40	-
62		24.64	23.81	6.46	-	-	-	-	0.36	-
63		25.34	22.55	6.26	-	-	-	-	-	0.02
64		25.85	22.37	5.77	-	-	-	-	-	0.04
65	4.5	25.35	22.64	5.71	16.03	-	-	-	-	-
66		23.96	20.98	5.65	22.58	-	-	-	-	-
67		24.11	20.50	5.02	16.76	-	-	-	-	-
68		26.05	20.52	5.53	18.46	-	-	-	-	-
69		23.54	18.17	4.72	-	99.66	-	-	-	-
70		22.61	18.45	4.52	-	98.35	-	-	-	-
71		23.57	18.87	4.81	-	99.01	-	-	-	-
72		25.08	21.22	6.40	-	98.68	-	-	-	-
73		25.41	19.70	4.68	-	-	3731	5.01	-	-
74		23.29	18.82	4.52	-	-	2894	3.36	-	-
75		23.13	18.88	4.77	-	-	2822	6.97	-	-
76		23.20	17.52	4.08	-	-	3149	5.11	-	-
77		23.52	18.49	4.50	-	-	-	-	0.42	-
78		23.61	19.51	5.12	-	-	-	-	0.36	-
79		26.51	20.77	6.49	-	-	-	-	-	2.06
80		23.53	19.80	5.64	-	-	-	-	-	0.04
81	5.2	22.82	18.22	5.16	11.14	-	-	-	-	-
82		21.29	16.67	3.74	19.72	-	-	-	-	-
83		20.69	16.24	3.10	17.65	-	-	-	-	-
84		24.18	19.59	4.39	16.17	-	-	-	-	-
85		23.44	17.96	4.03	-	99.68	-	-	-	-
86		22.36	17.67	4.10	-	99.41	-	-	-	-
87		24.08	19.81	4.65	-	99.54	-	-	-	-
88		22.58	19.07	4.84	-	99.47	-	-	-	-
89		24.08	17.46	3.86	-	-	2752	5.18	-	-
90		22.90	17.83	3.90	-	-	4100	4.94	-	-
91		24.16	18.29	4.75	-	-	3205	8.31	-	-
92		22.57	17.39	4.06	-	-	3353	6.14	-	-
93		22.97	17.63	4.08	-	-	-	-	0.38	-
94		24.06	19.63	3.76	-	-	-	-	0.43	-
95		24.00	18.70	3.90	-	-	-	-	-	0.03
96		22.84	19.74	4.63	-	-	-	-	-	0.03

4.2.8. Compactação das placas

Com a determinação do teor ótimo (conforme Capítulo 5 – Análise dos Resultados), realizado os ensaios e da obtenção dos resultados, foram confeccionadas as placas para a avaliação da deformação permanente e da permeabilidade. Foram moldadas no compactador LPC (*Laboratoire des Ponts et Chaussées*) do LTP/EPUSP (Laboratório de Tecnologia de Pavimentação/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).

O procedimento para a realização dos ensaios de compactação seguiu as especificações da norma francesa AFNOR-NF-P-98-250-2 (1993). Foram compactadas duas placas para cada uma das misturas estudadas, sendo placas retangulares de dimensões 180x500mm, com altura de 50mm.

Os materiais granulares foram aquecidos em estufa por 24 horas na temperatura de 180°C e o cimento asfáltico foi mantido em estufa aquecida a 150°C por mais de quatro horas. Instantes antes da mistura, os granulares e o CAP foram aquecidos nas temperaturas especificadas e monitorados por termômetro eletrônico. A energia de compactação é adotada conforme propõe a norma francesa AFNOR-NF-P-98-250-2 (1993), tendo em vista que o concreto asfáltico drenante será aplicado como camada de revestimento.

Após atingir a temperatura especificada, os materiais separados foram misturados até a perfeita homogeneização da massa (o ligante asfáltico foi primeiramente adicionado aos granulares mais graúdos, posteriormente, foi adicionada a parte fina dos agregados). Ao se completar o processo de mistura, a massa é lançada sobre uma bandeja e transferida para a estufa durante o tempo necessário à preparação de sua compactação (Figura 4.5).



FIGURA 4.5 – Procedimentos para a confecção das placas.

Cada mistura foi colocada em moldes de aço (Figura 4.6), em formato padrão de ensaio, para então serem compactadas no compactador LPC (Figura 4.7). O equipamento é constituído de uma mesa de compactação para a produção das placas ensaiadas.



FIGURA 4.6 – Molde com a placa compactada.



FIGURA 4.7 – Compactador LPC do LTP/EPUSP para moldagem das placas.

Por ser uma mistura aberta, a trabalhabilidade com o material ocasionava dificuldade no processo de compactação, sendo necessária e usual a colocação de uma chapa de aço sobre a mistura no molde, para a passagem do compactador pneumático sobre esta, procedendo à

compactação (Figura 4.8). Este procedimento, denominado de pré-compactação, tem como finalidade nivelar o material da placa para que possa ser feita a compactação.

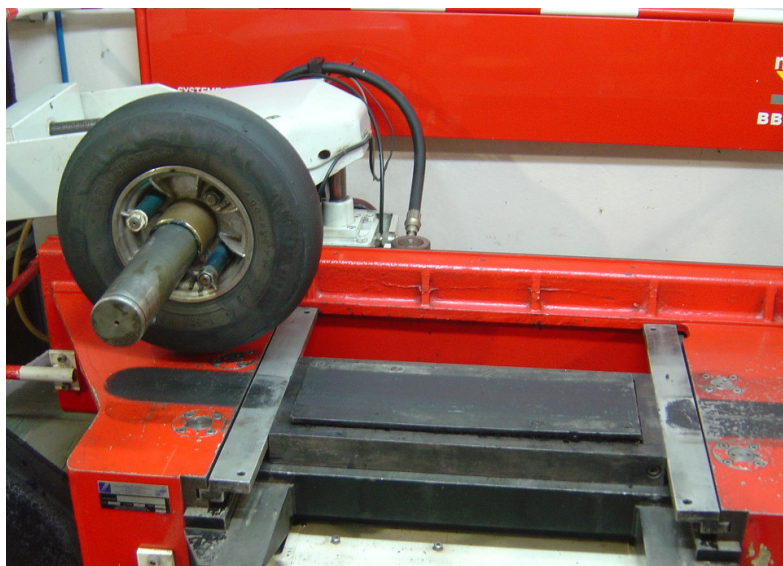


FIGURA 4.8 – Detalhe da compactação com chapa metálica.

4.2.9. Ensaio de permeabilidade das placas

Este ensaio permite, através da avaliação da capacidade de permeabilidade na placa ensaiada, caracterizar a velocidade de escoamento.

O equipamento utilizado para a realização desse ensaio foi um drenômetro do tipo Suíço, construído no Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (LP/UFSC). Os pontos de ensaio foram locados sobre a placa (Figura 4.15). A vedação da superfície de contato do fundo do drenômetro foi feita com a aplicação de massa de vedação, para impedir o fluxo de água pela macrotextura.

O uso de um drenômetro para o ensaio de permeabilidade é devido ao orifício de vazão do permeâmetro ser menor, delimitando uma área de contato pequena para a medida da permeabilidade na superfície do pavimento, podendo ser influenciada por sua macrotextura.



FIGURA 4.9 – Drenômetro e equipamentos utilizados.

Características do drenômetro:

- a) Cilindro de acrílico transparente;
- b) No terço médio da altura do cilindro existem duas linhas que delimitam um volume conhecido de água (0,7 litros), cujo tempo de escoamento será registrado;
- c) Para fixar o cilindro sobre a superfície do pavimento o aparelho possui em sua base um contrapeso de chumbo;
- d) No fundo o cilindro existe um furo com dimensões padronizadas, pelo qual a água escoar;
- e) A parte inferior da base do cilindro é revestida por uma lâmina de borracha, cuja função é aderir à superfície; e,
- f) Para evitar que a água escoe sem o devido registro do tempo, uma rolha é acoplada ao furo no fundo do cilindro.

As dimensões, bem como algumas características do drenômetro utilizado são apresentadas nas Figuras 4.10 à 4.13.

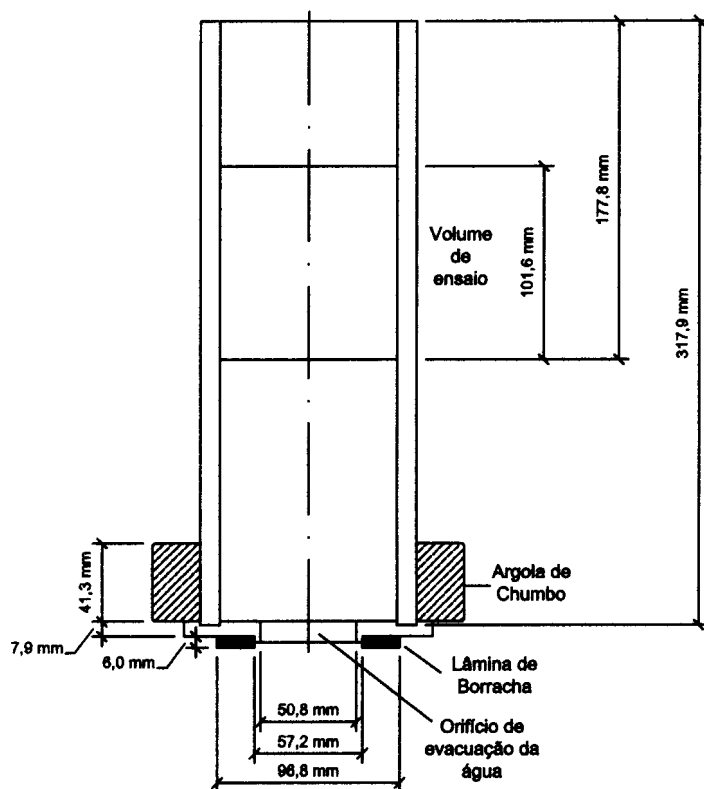


FIGURA 4.10 – Corte longitudinal do drenômetro (Ferreira, 2002).

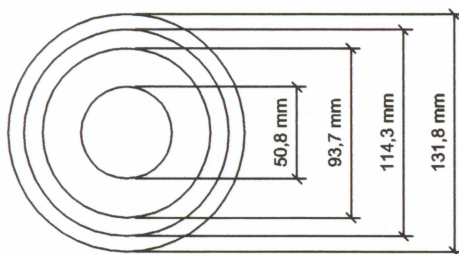


FIGURA 4.11 – Vista superior do drenômetro (Ferreira, 2002).

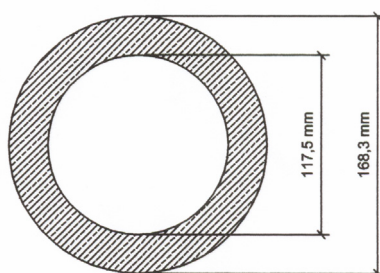


FIGURA 4.12 – Vista superior da argola de chumbo (Ferreira, 2002).

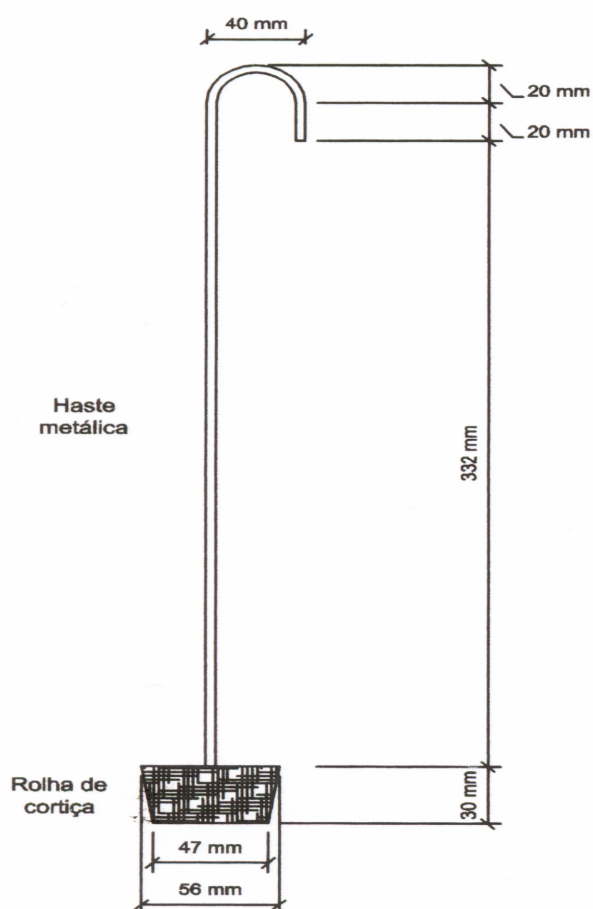


FIGURA 4.13 – Corte longitudinal da rolha de cortiça (Ferreira, 2002).

A permeabilidade foi determinada diretamente sobre a superfície da placa (Figura 4.14), mantendo livre a face inferior, isto é, sem impermeabilização.



FIGURA 4.14 – Ensaio de permeabilidade nas placas.

A permeabilidade foi medida em três pontos para cada placa, conforme ilustra o croqui da Figura 4.15, sendo T_1 , T_2 e T_3 os pontos de locação do drenômetro para a leitura dos tempos.

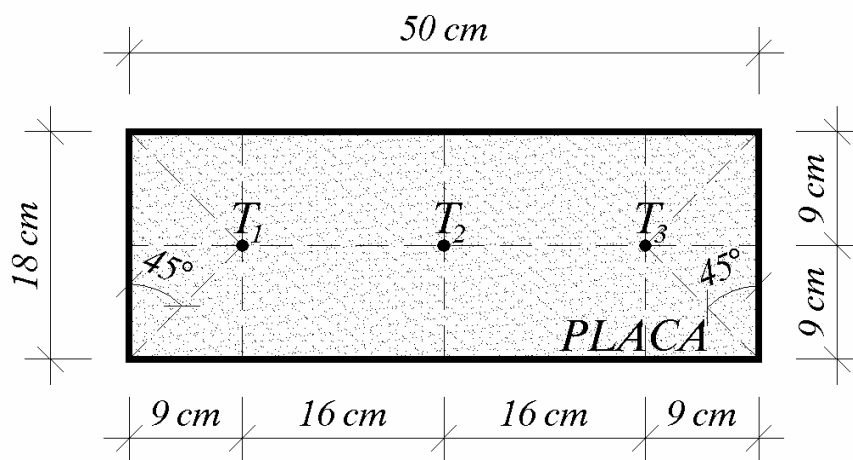


FIGURA 4.15 – Esquema dos pontos para análise da permeabilidade.

O ensaio determina o tempo para que um volume conhecido de água percole através da placa (revestimento) ensaiada. Uma vez que a área da interface no orifício inferior também é conhecida, o escoamento ou permeabilidade, permite seu cálculo, conforme expressão da equação 4.7.

$$P_b = \frac{L}{A_p \cdot T} \quad (4.7)$$

onde:

P_b – Permeabilidade, em cm/s;

L – Volume de água entre os meniscos do cilindro, em cm³;

A_p – Área do orifício inferior do permeâmetro, pelo qual há o escoamento, em cm²; e,

T – Tempo, em s.

4.2.10. Ensaio de deformação permanente das placas

Depois do ensaio de permeabilidade, as placas foram submetidas à ação do simulador de tráfego (Figura 4.16), avaliando o nível de deformação permanente. Este ensaio é regido por especificações da norma francesa AFNOR-NF-P-98-253-1 (1993).



FIGURA 4.16 – Equipamento de simulação de tráfego (deformação permanente).

Cada ensaio é realizado com uma placa de cada lado do equipamento. Os procedimentos para o processo de simulação das placas são:

1. Fixação das placas no console da máquina de simulação;
2. Instalação da sonda de controle da temperatura no interior da placa;
3. Verificação da pressão dos pneus, calibrados com pressão de 600kPa;
4. Medidas iniciais da superfície em 15 pontos na área de tráfego (padrão) (Figura 4.17). As medidas são realizadas com auxílio de um dispositivo com três extensômetros em linha, conforme ilustra a Figura 4.18;

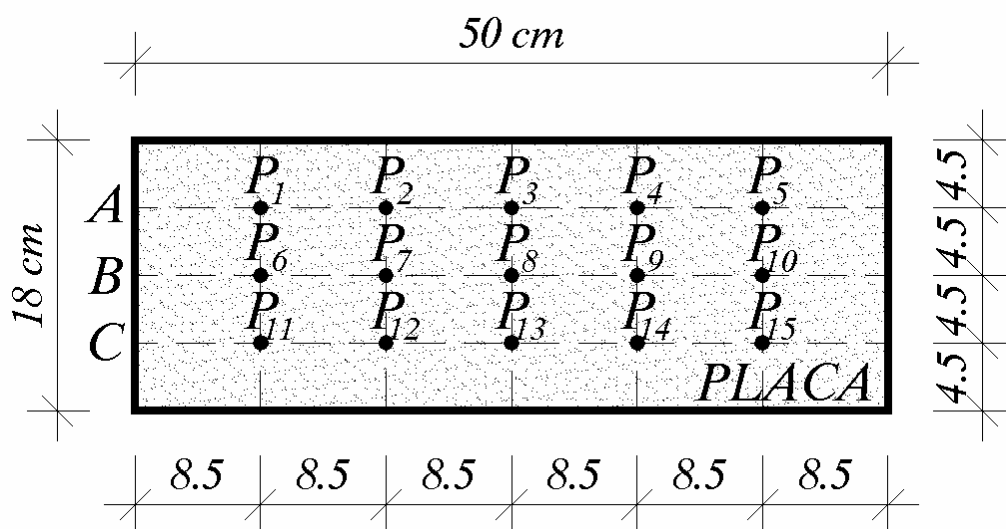


FIGURA 4.17 – Esquema dos pontos para leitura das deformações.

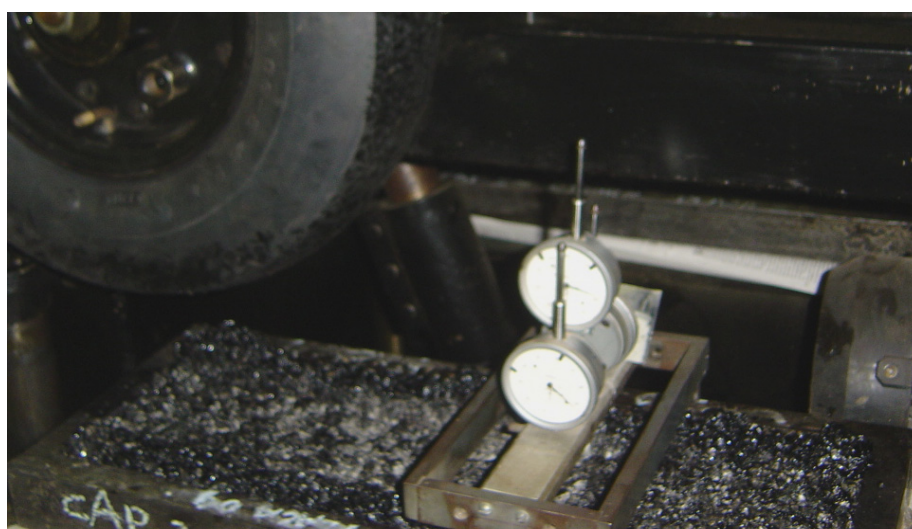


FIGURA 4.18 – Dispositivo de medida das deformações nas placas.

5. Aplicam-se 1.000 ciclos a frio (temperatura ambiente);
6. Faz-se a primeira medição;
7. O dispositivo de aquecimento da temperatura da câmara de ensaio é elevado a 60°C, climatizada pela própria máquina;
8. As placas são submetidas à frequência de 1Hz e com carga de 5.000N, conforme especificações da norma francesa AFNOR-NF-P-98-253-1 (1993); e,
9. As medidas de deformações do simulador são então, tiradas para 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos.

Antes de reiniciar cada solicitação dos ciclos, esperava-se uma hora para que a temperatura dentro da câmara voltasse à homogeneidade de 60°C.

CAPÍTULO 5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

A média dos valores calculados para o índice de vazios, vazios comunicantes, permeabilidade e perdas Cântabro, em função de cada mistura e sua respectiva granulometria, foram tiradas as seguintes conclusões para a determinação do teor ótimo:

- Ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2: Para a variação do ligante, verificou-se melhor resistência quanto à desagregação no ensaio Cântabro para um maior teor de ligante e para a maior granulometria. Porém, com maior teor de ligante, em contrapartida, apresentou menores índices de percentagem de vazios, vazios comunicantes e permeabilidade. A conclusão de um valor de teor ótimo, sem muitas perdas Cântabro e altos índices de vazios, vazios comunicantes e permeabilidade, intermediou assim os teores adotados, sendo este, de 4,0% de ligante asfáltico, para a granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$);
- Ligante asfáltico de asfalto-borracha: Da mesma forma, os melhores resultados quanto à desagregação no ensaio Cântabro foi para a mistura com maior percentagem de ligante. Houve uma significativa diminuição da permeabilidade e do índice de vazios e vazios comunicantes, porém, não muito em relação aos demais resultados. Por isso, optou-se em adotar um valor de teor ótimo com menor perda quanto à desagregação, com maior percentagem de ligante asfáltico, sendo este de 5,0%, também para a granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$); e,
- Ligante asfáltico com fibras de celulose: Analisando então a média dos valores nos ensaios realizados, da mesma forma que para o ligante asfáltico modificado por polímeros Eastman EE-2, têm-se os melhores resultados para um valor de teor médio e para a maior granulometria, ou seja, de 4,5% para granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

A partir da determinação desses teores, foram moldadas as placas de concretos asfálticos drenantes, realizando os ensaios de permeabilidade e deformação permanente.

A análise dos resultados foi feita considerando também os resultados de ensaios de concretos asfálticos drenantes convencionais, ou seja, que usaram ligantes asfálticos sem modificadores, do trabalho de iniciação científica de LEONETTI (2003), realizado na Universidade Federal de Santa Catarina, e os resultados com ligante modificado por copolímeros SBS, de MEURER FILHO (2001).

Os valores dos ensaios das misturas de concreto asfáltico drenante com ligante sem modificação, com modificação por copolímeros SBS e polímeros Eastman EE-2, por asfalto-borracha e com adição de fibras de celulose, foram justapostos em gráficos, particularizando as duas granulometrias, G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$) e G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$), em relação à percentagem de vazios, à percentagem de vazios comunicantes, à permeabilidade, ao desgaste Cântabro, estabilidade e fluência no ensaio Marshall, tração indireta e deformação permanente, sendo apresentadas a seguir.

5.1. Percentagem de Vazios

Os concretos asfálticos drenantes não modificados obtiveram maiores valores de percentagem de vazios, proporcionalmente para todas as percentagens de ligantes asfálticos (Figuras 5.1 e 5.2). Contudo, as misturas com asfalto-borracha e com fibras de celulose apresentaram valores com menor índice de vazios.

Em geral, a percentagem de vazios decresceu com o aumento do teor de ligante asfáltico. O tamanho máximo dos granulares não revelou variação significativa de percentagem de vazios.

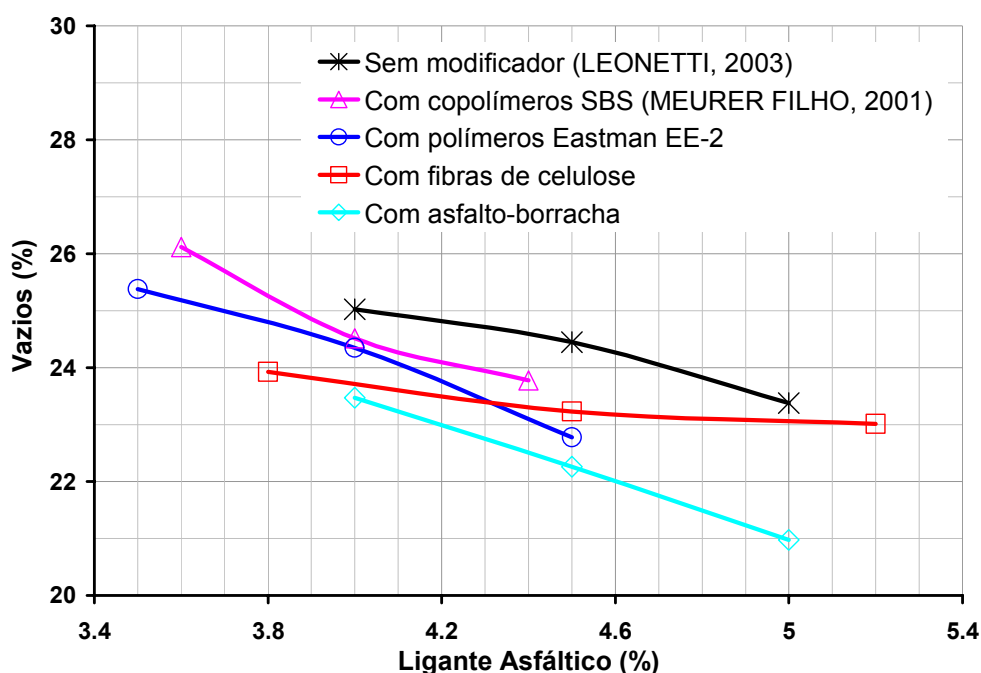


FIGURA 5.1 – Percentagem de vazios - Granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

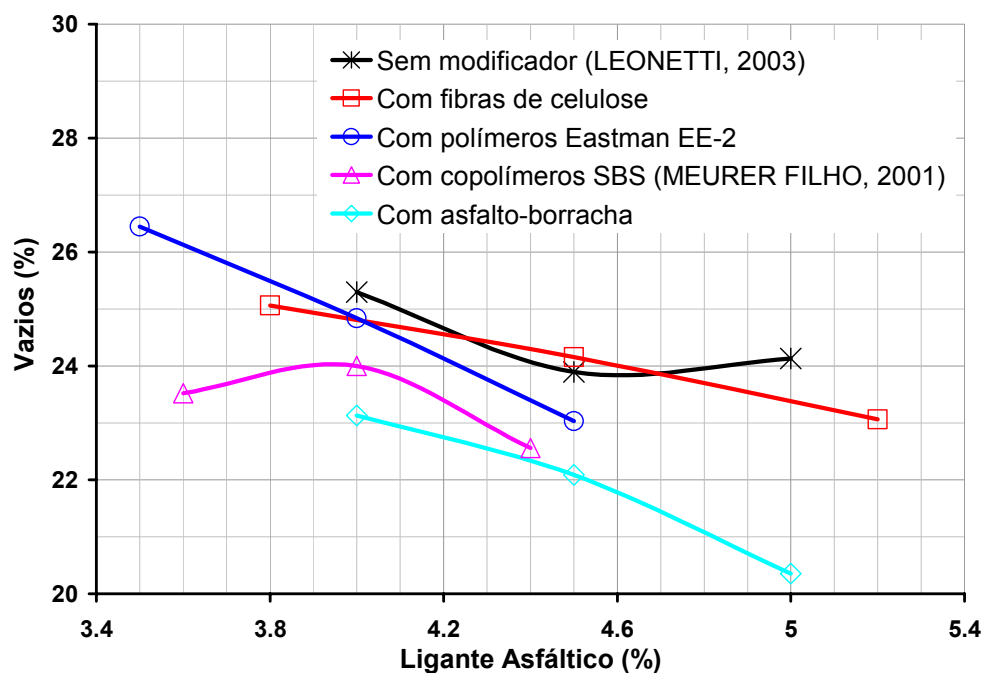


FIGURA 5.2 – Percentagem de vazios - Granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

5.2. Percentagem de Vazios Comunicantes

A adição de fibras de celulose aumenta a percentagem do índice de vazios comunicantes na mistura, seguida pela mistura sem adição de modificadores (Figuras 5.3 e 5.4).

Os ligantes asfálticos modificados com asfalto-borracha forneceram valores mais baixos que os demais, seguidos pelos modificados por copolímeros SBS. A mistura com os ligantes modificados pelos polímeros Eastman EE-2, propiciaram vazios comunicantes numa situação intermediária.

Para todas as misturas, o aumento do tamanho máximo dos granulares, apresentou redução acentuada da percentagem dos vazios comunicantes com o aumento do teor de ligante. Percebe-se também que, com o aumento do teor de ligante, decresce a percentagem de vazios comunicantes. Isto se deve ao maior teor de ligante, que ocupa os espaços vazios entre os granulares, impedindo a passagem da água.

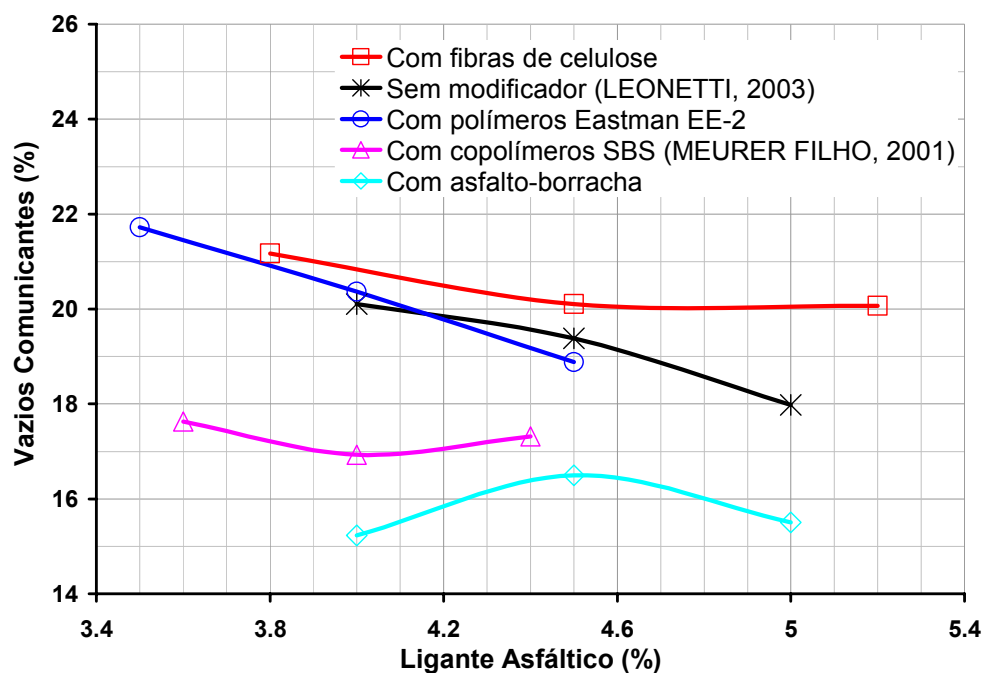


FIGURA 5.3 – Percentagem de vazios comunicantes - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).

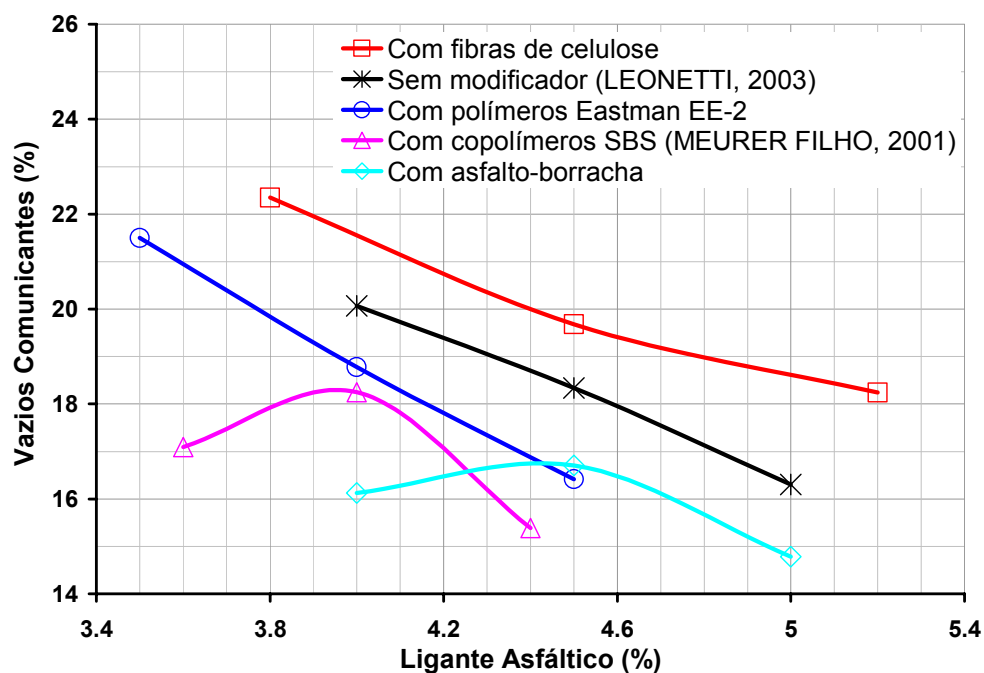


FIGURA 5.4 – Percentagem de vazios comunicantes - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).

5.3. Permeabilidade nos Corpos-de-prova Marshall

Quanto à permeabilidade, com exceção da mistura com asfalto-borracha, todas as outras misturas obtiveram valores aproximados. Percebe-se novamente que, com o aumento do teor de ligante o índice de vazios na mistura decresce e, conseqüentemente, a permeabilidade da mesma (Figuras 5.5 e 5.6).

Como a permeabilidade é medida na direção vertical, os valores de permeabilidade da mistura em asfalto-borracha, sensivelmente mais baixos, podem estar relacionados ao provável escoamento do ligante para a camada inferior, durante o período de repouso dos corpos-de-prova.

Na comparação entre as duas granulometrias, a granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$) apresentou valores de permeabilidade maiores que a granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$), isso devido ao aumento dos vazios intergranulares nas misturas, com o aumento do tamanho máximo do agregado.

Na granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$), os resultados entre as misturas com fibras de celulose e as modificadas por polímeros Eastman EE-2 e para as misturas sem modificadores, obtiveram uma relação equivalente de permeabilidade.

Não foram feitos ensaios de permeabilidade nos corpos-de-prova Marshall para ligantes modificados por copolímeros SBS, estudados por MEURER FILHO (2001).

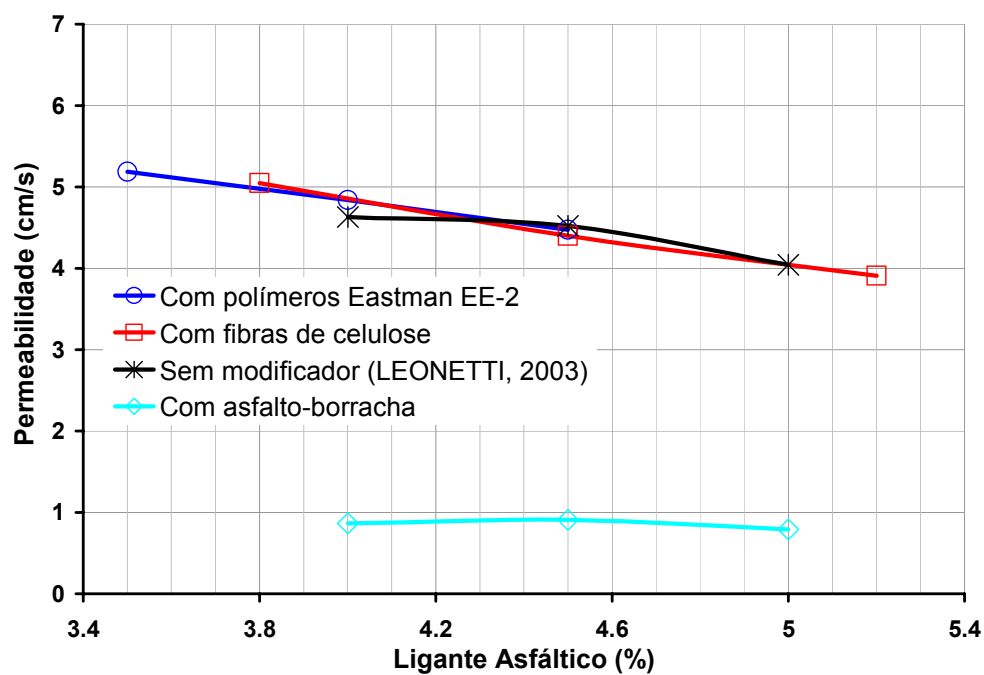


FIGURA 5.5 – Permeabilidade - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).

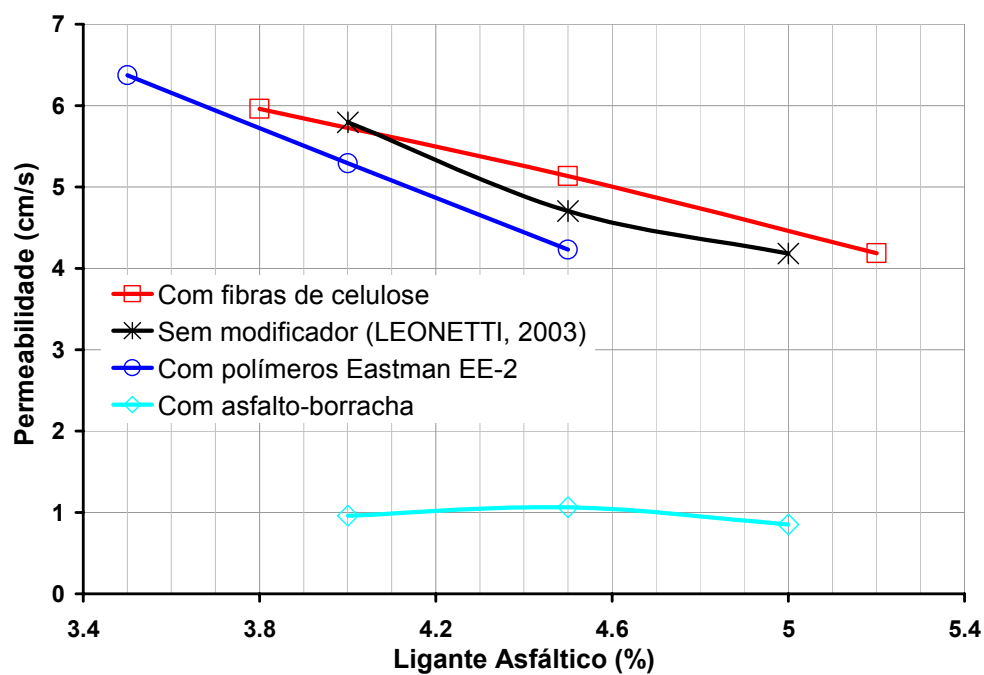


FIGURA 5.6 – Permeabilidade - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).

5.4. Desgaste Cântabro

No ensaio Cântabro, realizado à temperatura de 25°C, denominado ensaio seco (Figuras 5.7 e 5.8), e à temperatura de 60°C, denominado ensaio úmido (Figuras 5.9 e 5.10), observa-se que para as duas granulometrias, há uma tendência da percentagem de desgaste decrescer com o aumento do teor de ligante asfáltico e um aumento do desgaste com o tamanho máximo dos granulares.

As perdas no ensaio úmido foram consideravelmente maiores que no seco, isto ocorre porque em temperaturas mais elevadas (60°C).

Nos ensaios de desgaste Cântabro seco, na temperatura ambiente de 25°C, os ligantes modificados por copolímeros SBS (MEURER FILHO, 2001), obtiveram para todos os teores de ligantes e para as duas granulometrias valor de desgaste inferior exigido pelas especificações, conforme norma DNER-ME 383/99 (1999), de 25% de perdas no desgaste. Para as misturas com fibras de celulose, houve um bom desempenho em teores de ligante superiores a 4,3% e para as misturas de asfalto-borracha, teores superiores a 4,8%, atendendo também as especificações da norma vigente para este ensaio.

Com relação aos ensaios de desgaste Cântabro úmido, na temperatura de 60°C durante 24 horas, as misturas com asfalto-borracha foram as únicas que atenderam os quesitos normalizados e somente com teores de ligantes asfálticos superiores a 4,7%, sendo isso, para as duas granulometrias estudadas. As demais misturas ensaiadas não alcançaram as exigências da norma, enfatizando a nocividade do ensaio quando realizado úmido e com temperatura mais elevada.

De maneira geral, todas as misturas modificadas ensaiadas e a não modificada, para os concretos asfálticos drenantes estudados sofreram grande perdas no desgaste Cântabro, principalmente quando confeccionados com menores teores de ligante asfáltico e também quando submetidos a um ensaio em condições mais severas, no caso, o ensaio realizado úmido.

Não foram feitos ensaios de desgaste Cântabro úmido para ligantes modificados por copolímeros SBS, estudados por MEURER FILHO (2001).

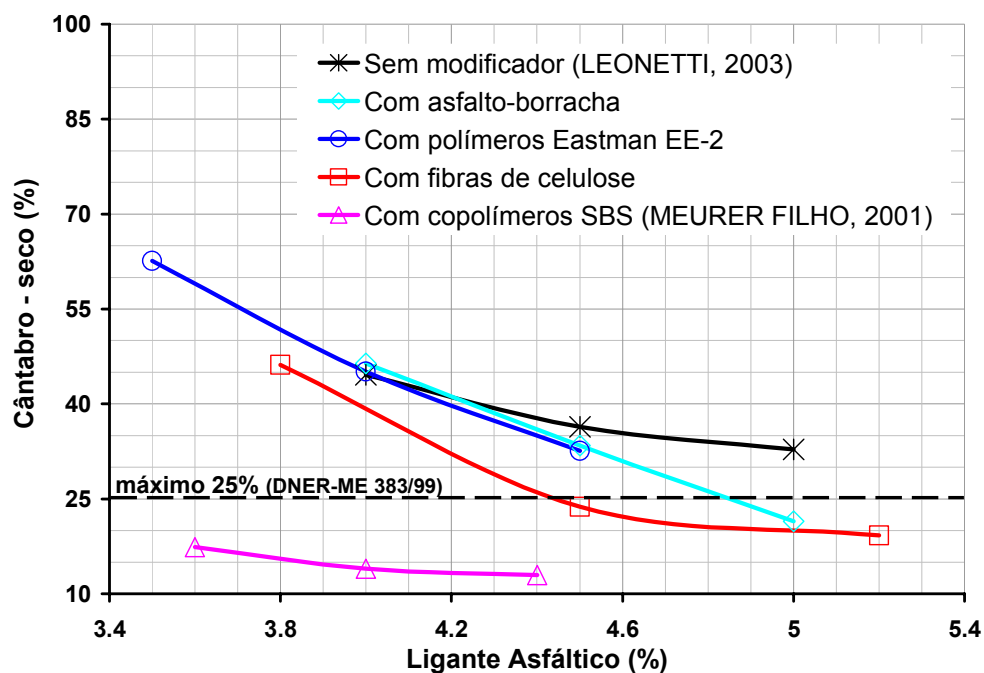


FIGURA 5.7 – Cântabro (seco à 25°C) - Granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

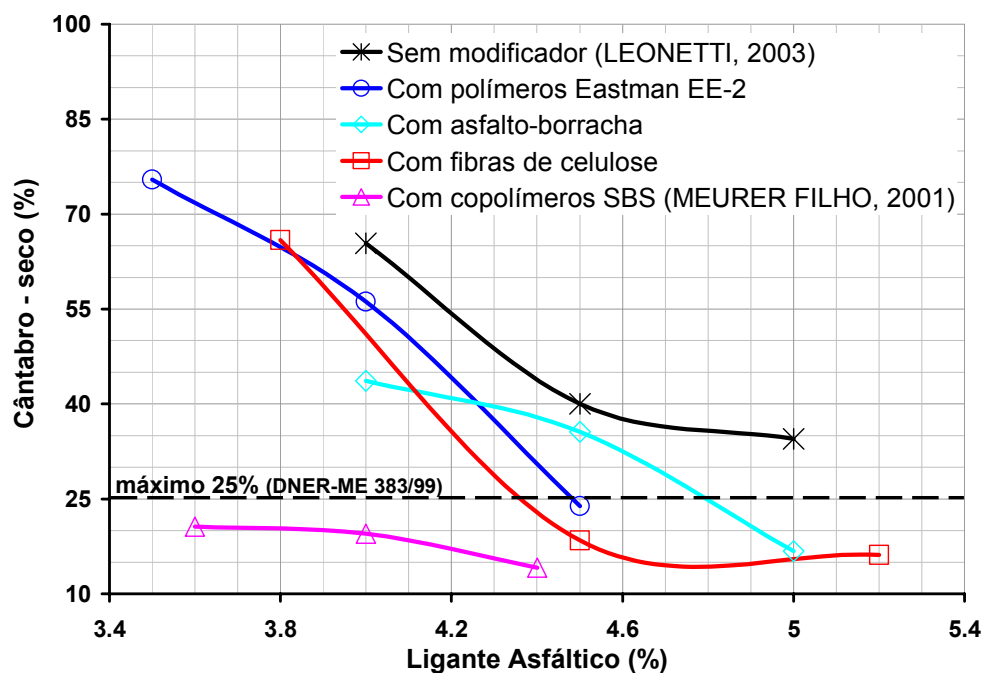


FIGURA 5.8 – Cântabro (seco à 25°C) - Granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

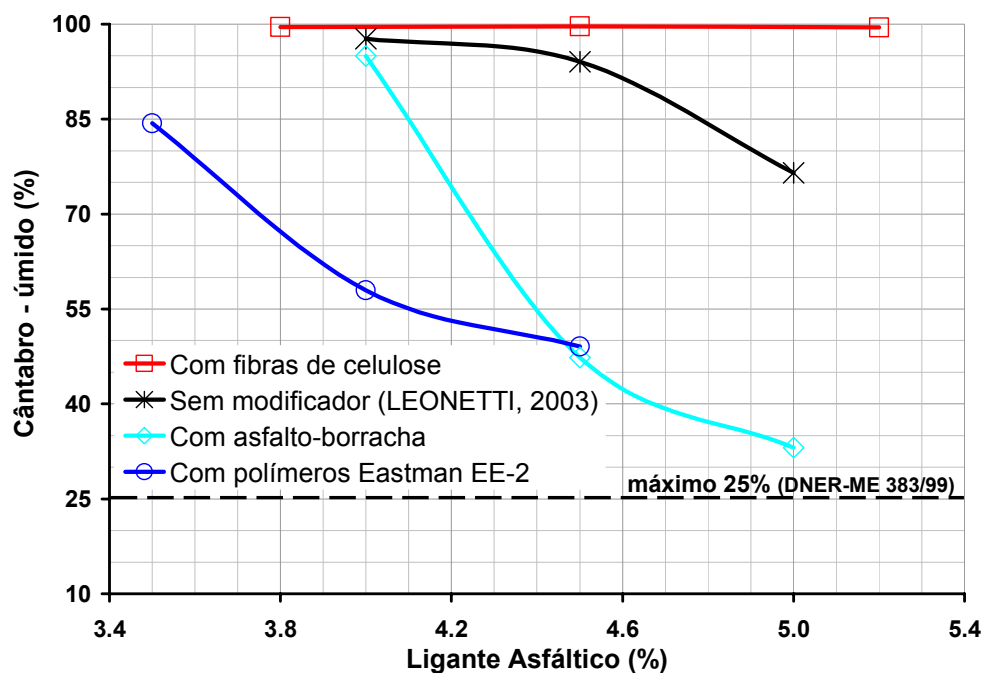


FIGURA 5.9 – Cântabro (úmido à 60°C) - Granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

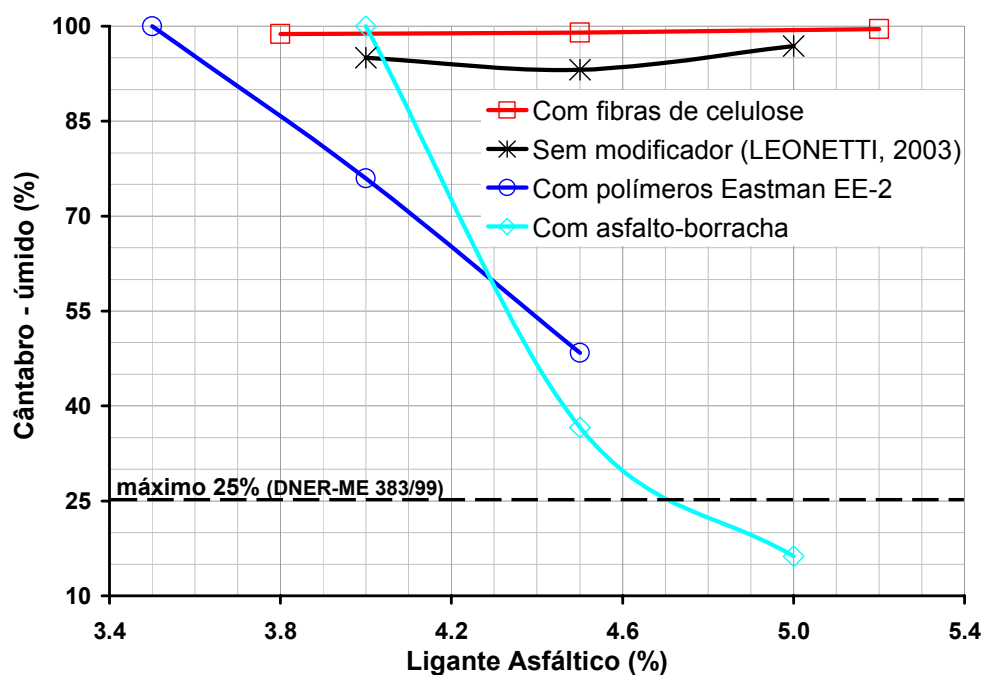


FIGURA 5.10 – Cântabro (úmido à 60°C) - Granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

5.5. Estabilidade e Fluência Marshall

Os maiores valores de estabilidade ocorreram nas misturas com asfalto-borracha, as misturas sem modificador e com polímeros Eastman EE-2 apresentaram praticamente os mesmos valores e os menores valores de estabilidade foram observados nas misturas com fibras de celulose (Figuras 5.11 e 5.12).

O tamanho dos granulares, para as duas granulometrias utilizadas, alterou de forma pouco significativa a estabilidade das misturas, com uma pequena queda da estabilidade com tamanho maior dos granulares.

A mistura com asfalto-borracha apresentou valores mais elevados de estabilidade, justificado pela característica mais viscosa do ligante, fornecido pela incorporação da borracha moída de pneus.

A mistura sem modificador praticamente não sofreu influência na estabilidade com o aumento da percentagem de ligante asfáltico.

Para a granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$), há uma queda da fluência com o aumento do teor de ligante asfáltico, somente para as misturas com asfalto-borracha e sem modificador, as misturas com fibras de celulose e polímeros Eastman EE-2 não possuíram variação significativa (Figuras 5.13 e 5.14).

Na granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$), para todas as misturas a fluência aumenta com o aumento do teor de ligante asfáltico. Contudo, o ligante modificado por polímeros Eastman EE-2 apresentou valores de deformação menores, indicando maior coesão e maior rigidez da mistura.

Não foram feitos ensaios de estabilidade e fluência Marshall para ligantes modificados por copolímeros SBS, estudados por MEURER FILHO (2001).

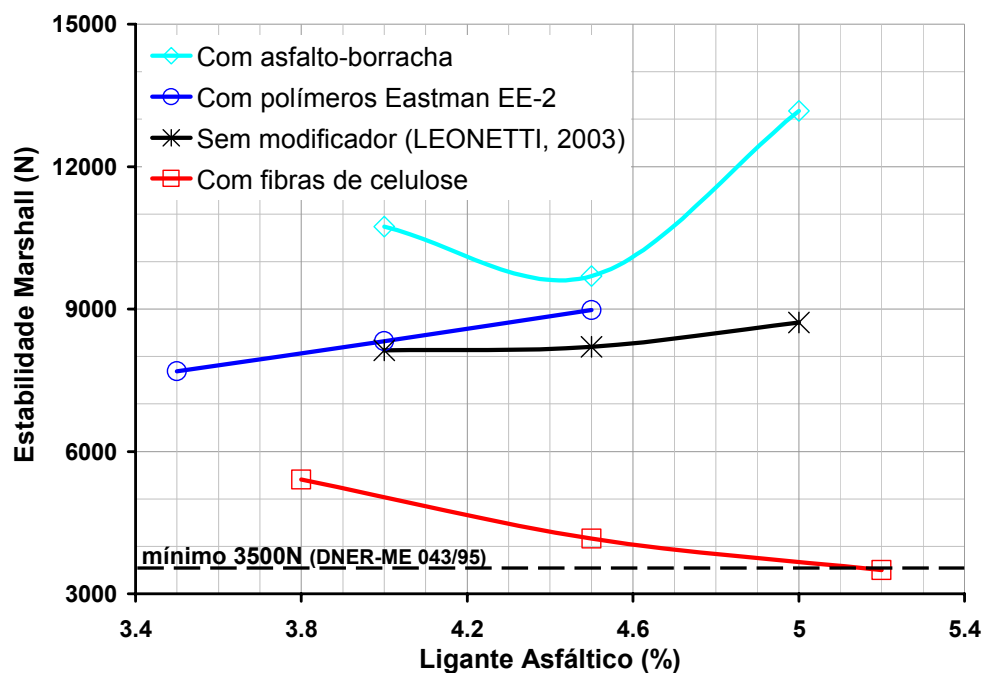


FIGURA 5.11 – Estabilidade Marshall - Granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

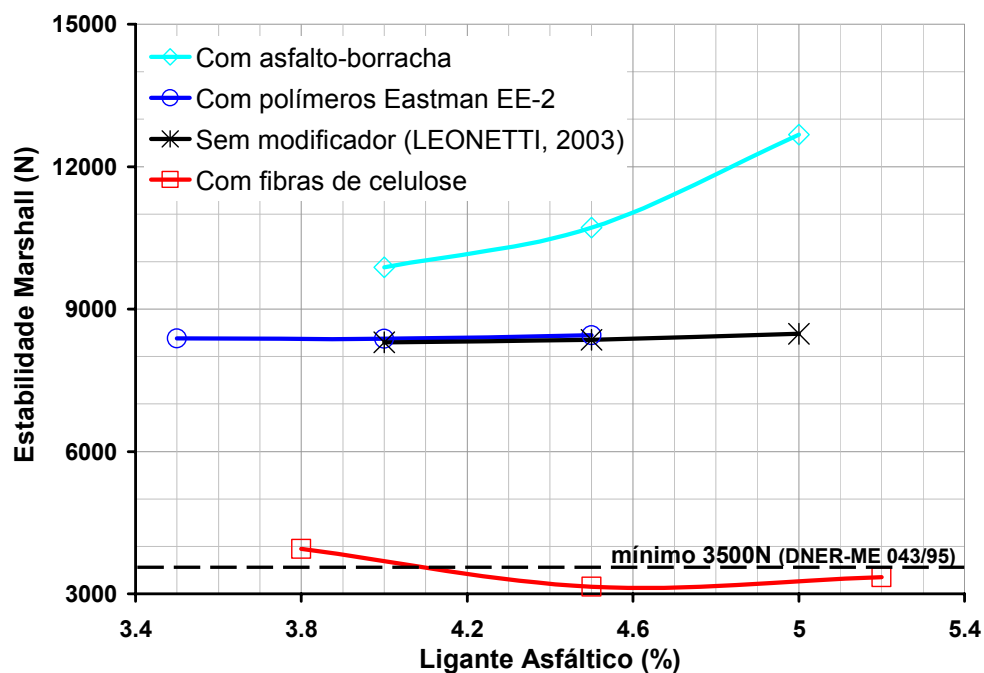


FIGURA 5.12 – Estabilidade Marshall - Granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

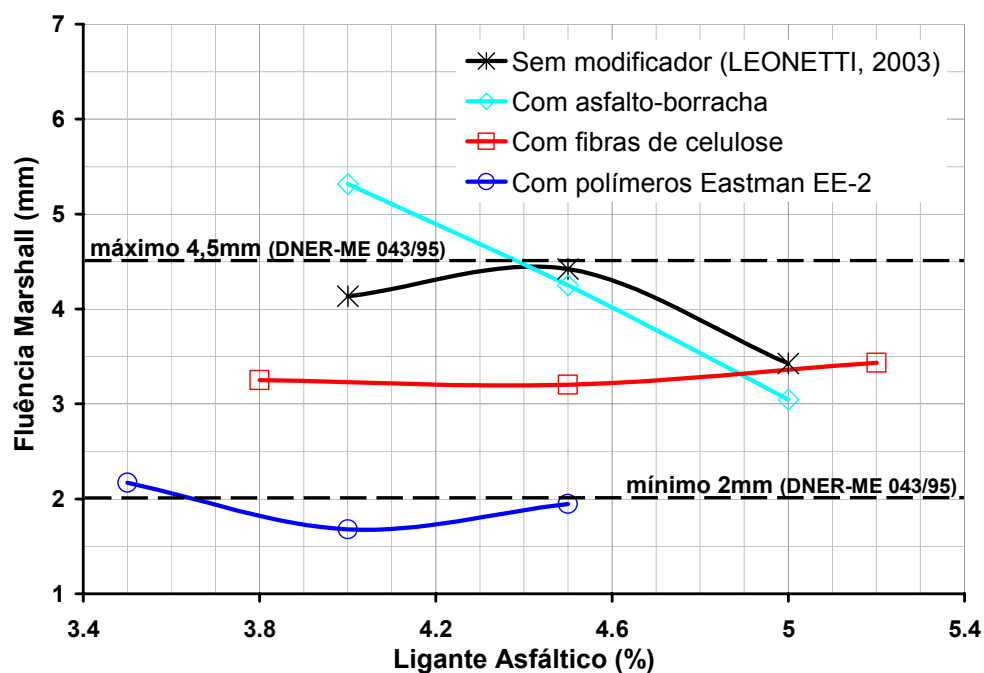


FIGURA 5.13 – Fluência Marshall - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).

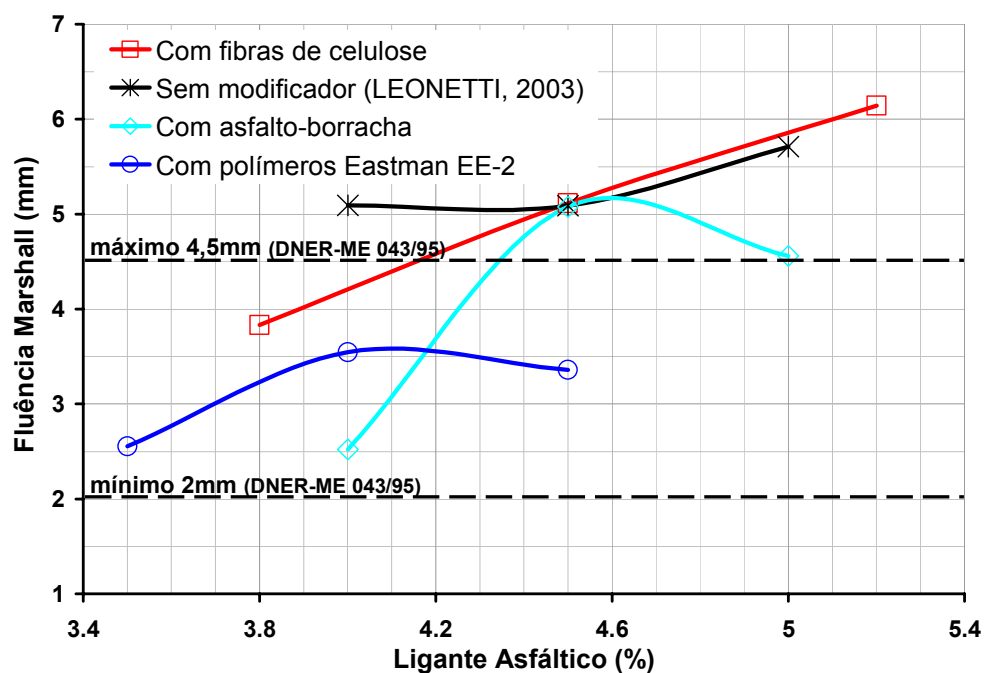


FIGURA 5.14 – Fluência Marshall - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).

5.6. Resistência à Tração Indireta

Nos ensaios de tração indireta, também realizados à temperatura de 25°C (ensaio seco), em ambas as granulometrias, os valores de tração foram superiores a 0,55MPa, limite especificado pela norma DNER-ME 138/94 (1994), exceto para as misturas com adição de fibras de celulose (Figuras 5.15 e 5.16). Neste ensaio, os maiores valores de tração ocorreram com a mistura sem modificador e os menores valores com as misturas com adição de fibras de celulose.

Nos ensaios realizados à temperatura de 60°C (ensaio úmido), todos os valores de tração indireta obtidos para as duas granulometrias foram inferiores a 0,55MPa (Figuras 5.17 e 5.18). A alta temperatura afetou, significativamente, a suscetibilidade térmica do ligante. Os menores valores de tração, ocorreram novamente para as misturas com adição de fibras de celulose.

A mistura com asfalto-borracha, alcançou resultados superiores a 0,55MPa, para teores de ligantes asfálticos acima de 4,2%, com aumento acentuado da resistência à tração indireta em relação ao teor de ligante.

A mistura sem modificadores, apresentou valores elevados de tração em ambos os ensaios, para todos os teores de ligantes asfálticos, todos os valores considerados satisfatórios de resistência à tração, conforme especificação da norma DNER-ME 138/94 (1994).

Não foram realizados os ensaios de resistência à tração para os ligantes modificados por copolímeros SBS estudados por MEURER FILHO (2001).

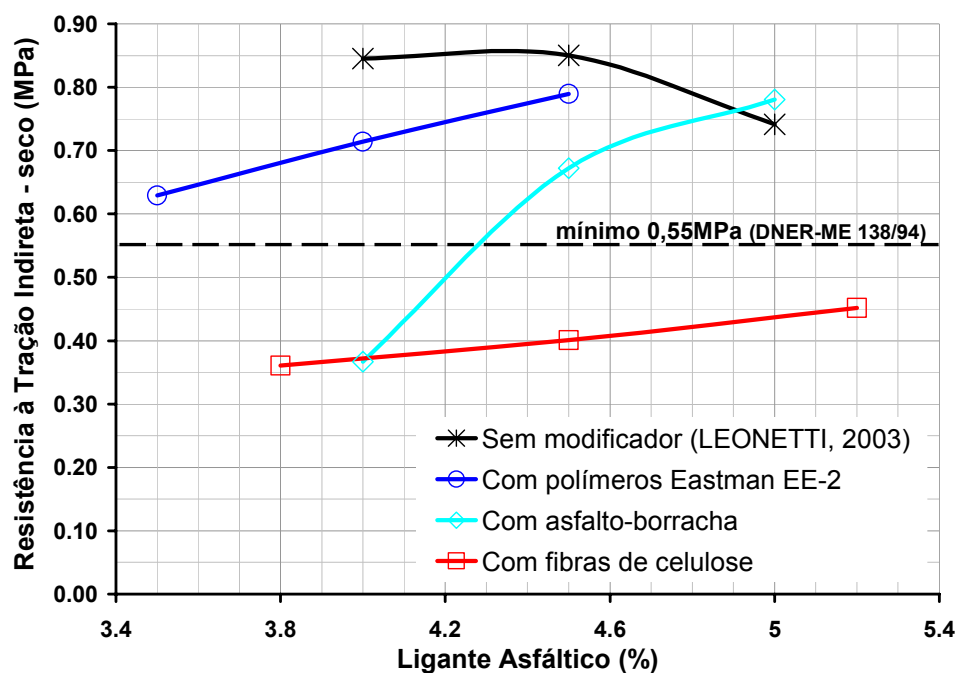


FIGURA 5.15 – Tração Indireta (seco à 25°C) - Granulometria G1 ($D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$).

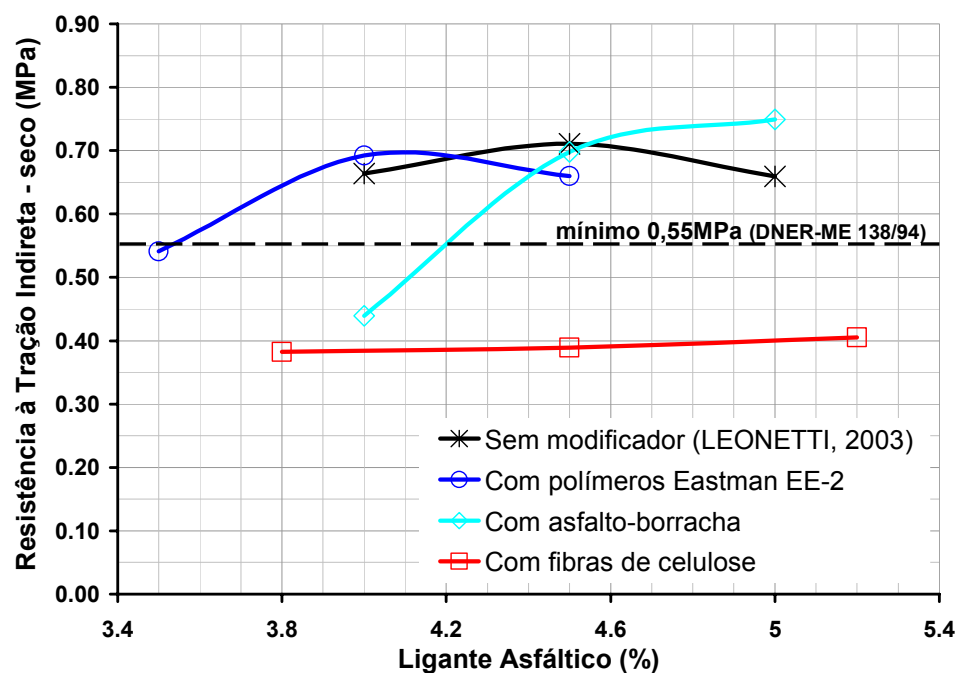


FIGURA 5.16 – Tração Indireta (seco à 25°C) - Granulometria G2 ($D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$).

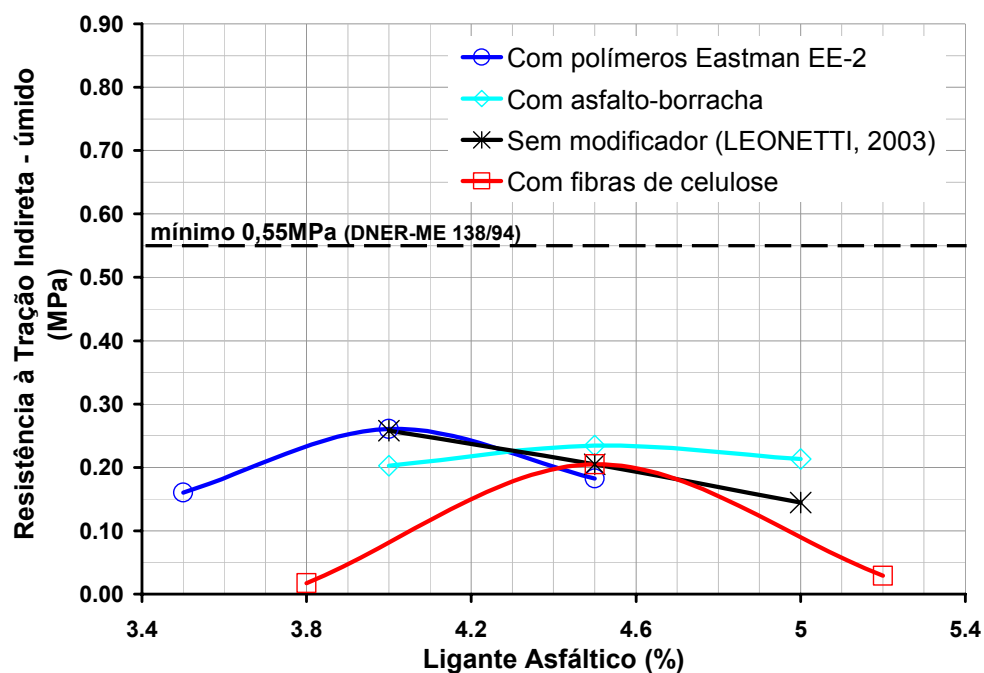


FIGURA 5.17 – Tração Indireta (úmido à 60°C) - Granulometria G1 ($D_{máx}=9,50\text{mm}$).

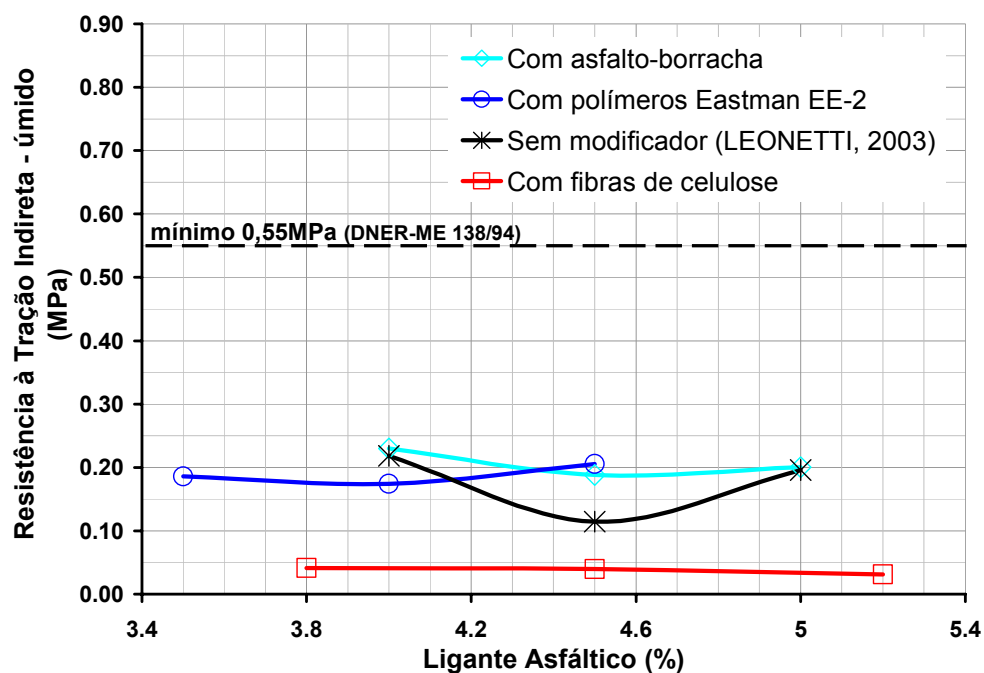


FIGURA 5.18 – Tração Indireta (úmido à 60°C) - Granulometria G2 ($D_{máx}=12,50\text{mm}$).

5.7. Permeabilidade nas Placas

A permeabilidade medida nas placas com ligantes asfálticos modificados por polímeros Eastman EE-2 apresentou maior valor de permeabilidade, seguida das demais misturas. A permeabilidade nas misturas de asfalto-borracha, foi mais que nas misturas modificadas por copolímeros SBS (MEURER FILHO, 2001), que apresentou a menor permeabilidade.

Os valores de permeabilidade em todas as placas estudadas, foram muito altos (10cm/s a 18cm/s), uma vez que, para concretos asfálticos drenantes, o valor mínimo é de 0,6cm/s para permeabilidade em campo, de acordo com a norma francesa AFNOR-NF-P-98-254-2 (1993).

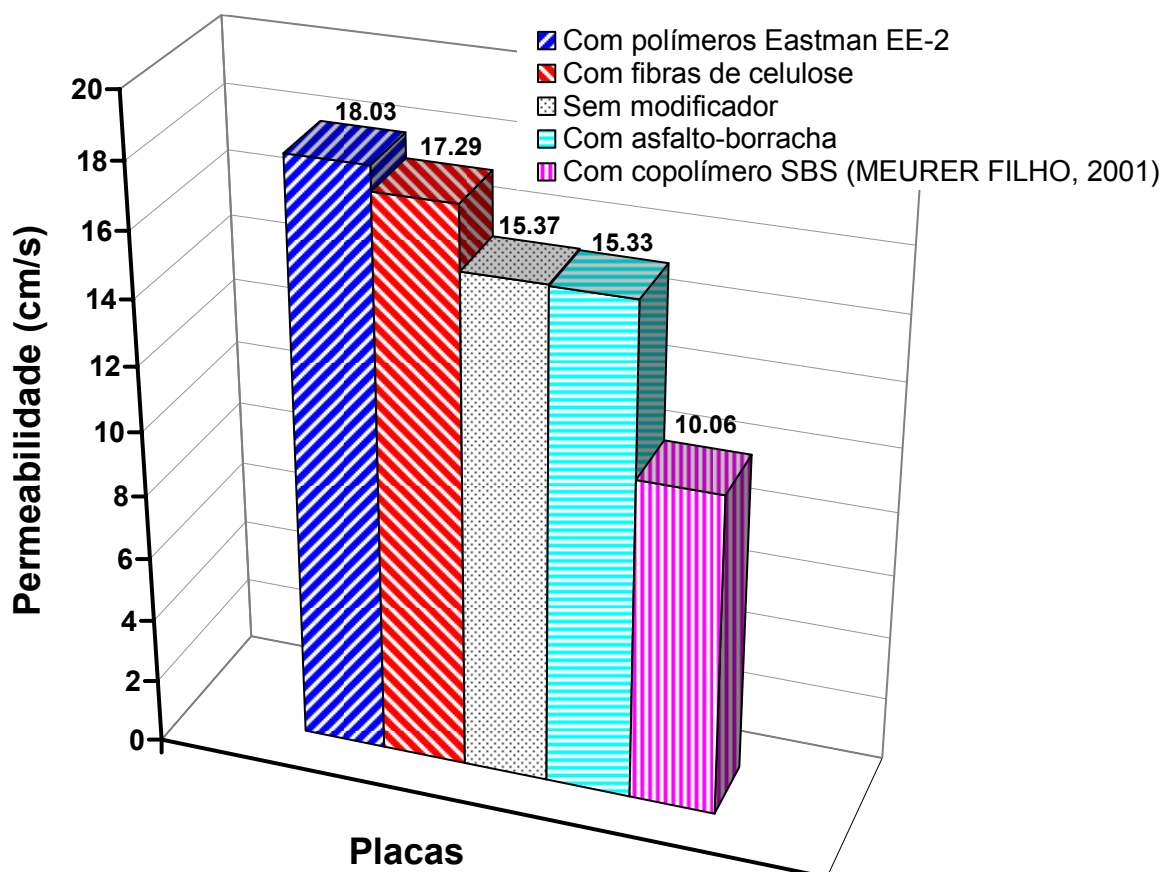


FIGURA 5.19 – Permeabilidade nas placas.

É necessário mencionar que, na realização do ensaio em laboratório, a placa encontra-se bi-apoiada, tendo a face inferior e as bordas livres. A água não encontra resistência ao fluxo na face inferior e nas bordas, assim, os valores são mais elevados do que uma camada apoiada em camada impermeável, que é a situação real no campo.

5.8. Deformação Permanente

Para a determinação da deformação permanente a partir das leituras do ensaio, é utilizada a equação 5.1 (AFNOR-NF-P-98-253-1 (1993)), conforme segue:

$$DP=a N^b \quad (5.1)$$

onde:

DP – Profundidade da deformação, em percentagem de espessura;

N – Número de ciclos; e,

a e b – constantes determinadas experimentalmente a partir de análise de regressão.

Infelizmente, todas as placas, das misturas estudadas, deram resultados insatisfatórios ao ensaio, ultrapassando o valor estabelecido pela norma (AFNOR-NF-P-98-253-1 (1993)), cujo limite é de 10% de deformação em relação à espessura da placa para aplicação de 30.000 ciclos, para as camadas de superfície.

Com exceção apenas das placas estudadas por MEURER FILHO (2001), com ligantes modificados por copolímeros SBS, os valores encontrados em sua pesquisa ficaram em conformidade com a norma, todas as granulometrias forneceram valores entre 7% e 9% de deformação em relação à espessura da placa, conforme Figuras 5.20, 5.21 e 5.22.

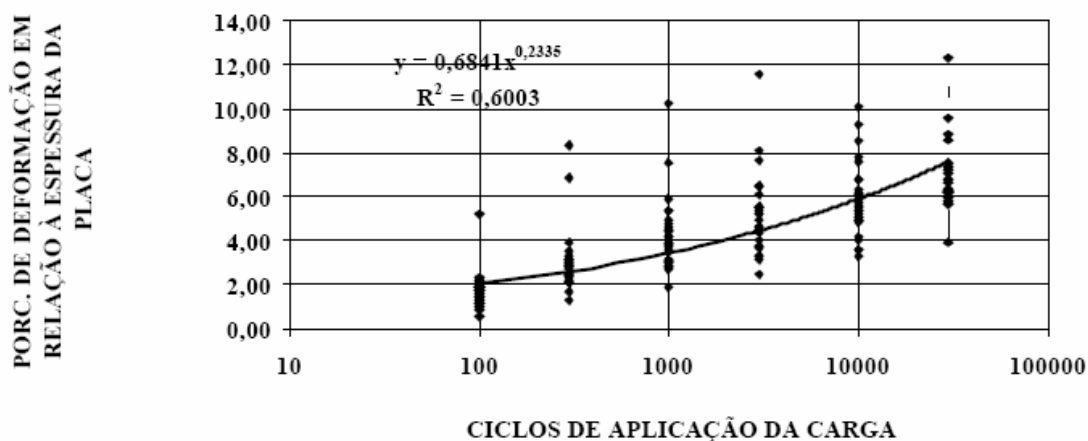


FIGURA 5.20 – Deformação permanente para $D_{\text{máx}}=9,50\text{mm}$ (brecha 0/4) para espessura da placa de 5,0cm na segunda etapa do trabalho de MEURER FILHO (2001).

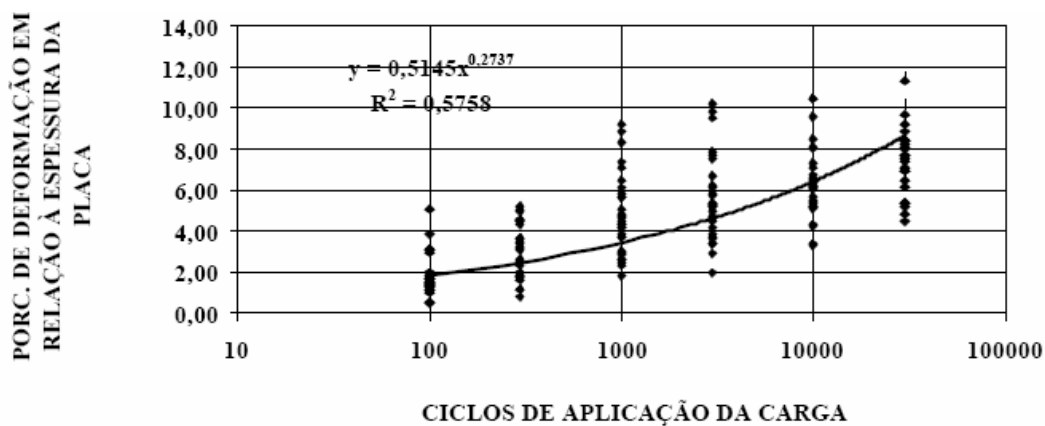


FIGURA 5.21 – Deformação permanente para $D_{\text{máx}}=12,50\text{mm}$ (brecha 0/6) para espessura da placa de 5,0cm na segunda etapa do trabalho de MEURER FILHO (2001).

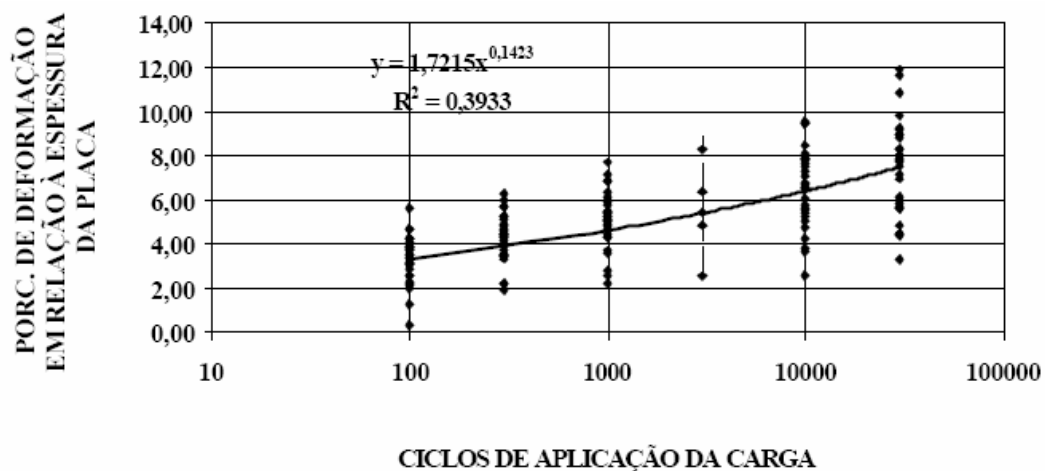


FIGURA 5.22 – Deformação permanente para $D_{\text{máx}}=19,10\text{mm}$ (brecha 0/9) para espessura da placa de 5,0cm na segunda etapa do trabalho de MEURER FILHO (2001).

Por motivos de força maior, devido a problemas de manutenção do compactador LPC, os ensaios não puderam ser repetidos, para confirmar os resultados.

Os procedimentos de laboratório podem ter influenciado os resultados da deformação permanente. A determinação da permeabilidade foi feita com menos de 24 horas após a compactação. O ensaio de deformação permanente foi feito imediatamente após o ensaio de permeabilidade. De modo que, a deformação permanente foi realizada com as placas em condição úmida, o que não é previsto pela norma AFNOR-NF-P-98-253-1 (1993). A carência de um período de repouso pode ter afetado os resultados da deformação permanente.

Se houvesse possibilidade da repetição dos ensaios, poder-se-ia estabelecer um tempo de repouso (por exemplo, uma semana) para verificar os resultados.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nas condições e forma que foram conduzidos os ensaios realizados, os resultados obtidos demonstraram que, as misturas de concretos asfálticos drenantes estudadas, sofrem influência do tipo de modificador e incorporador utilizados, do teor de ligante, como também, a granulometria dos agregados. Esses aspectos são apresentados a seguir, de forma individual, tomando referência o teor ótimo de ligante de cada mistura.

6.1. Agentes Modificadores

- As misturas com asfalto-borracha apresentaram valores menores de percentagem de vazios, vazios comunicantes, permeabilidade e perdas no desgaste de desagregação no ensaio Cântabro, principalmente no ensaio úmido, que para os outros modificados. Os valores da estabilidade Marshall nas misturas com asfalto-borracha foram superiores as outras misturas. No ensaio de tração indireta, ensaiado a seco, a resistência foi satisfatória no uso da granulometria G1 e houve melhora da resistência com a adoção da granulometria G2.
- As misturas de concreto asfáltico drenante com adição das fibras de celulose aumentaram a percentagem de vazios comunicantes e a permeabilidade. No ensaio de desgaste Cântabro, as fibras de celulose diminuíram a desagregação no ensaio seco, porém, no ensaio úmido, apresentaram maior desgaste.
- Os ligantes modificados por polímeros Eastman EE-2 apresentaram elevados valores de percentagem de vazios, vazios comunicantes e permeabilidade, contudo, elevadas perdas no ensaio de desgaste Cântabro. Quanto à estabilidade e à fluência no ensaio Marshall, os valores foram condizentes ao especificado pela referida norma. No ensaio de tração indireta por compressão diametral, as misturas com polímeros Eastman EE-2, também apresentaram valor de resistência elevada.

6.2. Teores de Ligantes

- A percentagem de vazios, vazios comunicantes e a permeabilidade das misturas estudadas decresce com o aumento do teor de ligante asfáltico, independentemente do tipo de modificador utilizado e da granulometria adotada.

- O desgaste no ensaio Cântabro, seco ou úmido, apresentou redução da desagregação com o aumento do teor de ligante asfáltico.
- A estabilidade das misturas, apresenta uma pequena tendência de aumento do teor de ligante, com exceção da mistura com fibras de celulose. A fluência não foi afetada pelo teor de ligante na granulometria G1, porém, na granulometria G2, o aumento do teor de ligante aumentou consideravelmente a fluência das misturas.
- No ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral, a seco obteve-se uma tendência no aumento da resistência com o aumento do teor de ligante, no ensaio úmido, o aumento do teor de ligante não contribui de forma significativa na melhora ou acréscimo da resistência.

6.3. Granulometria

- A granulometria G1 e G2 apresentaram valor de percentagem de vazios e vazios comunicantes, permeabilidade no mesmo domínio, isto é, sem significativa variação.
- Os valores das perdas no ensaio Cântabro a seco foram menores na granulometria G1. No ensaio Cântabro úmido, ocorreram valores significativamente similares, a exceção da mistura com asfalto-borracha, que apresentou valores inferiores no domínio de teores de ligante mais elevado.
- As diferenças granulométricas alteram de forma pouco significativa à estabilidade Marshall, observando-se uma pequena queda da estabilidade com o aumento da granulometria. A fluência da mistura sofre um aumento significativo com o emprego da granulometria G2, obtendo menores valores de deformações para o uso da granulometria G1.
- As resistências na tração indireta, no ensaio seco, foram menores na granulometria G2, com exceção da mistura com adição de fibras de celulose, que apresentaram os mesmos valores. No ensaio úmido, a granulometria não afetou os resultados.

6.4. Recomendações e Sugestões

Os ensaios de deformação permanente foram realizados imediatamente após o ensaio de determinações da permeabilidade, que, por sua vez, foram ensaiados imediatamente após a compactação. Parece ser recomendável deixar o concreto asfáltico em repouso por alguns dias

após a compactação e após o ensaio de permeabilidade para realizar ensaios de deformação permanente e Marshall.

O prosseguimento dos estudos poderia desenvolver os seguintes temas:

- Estudar os efeitos dos fileres na formação do mástique dos concretos asfálticos drenantes, tais como as cales;
- Estudar agentes modificadores de misturas asfálticas que otimizem o desempenho do mástique dos concretos asfálticos drenantes, favorecendo a resistência à deformação permanente e a desagregação; e,
- Investigar os concretos asfálticos drenantes para aplicação em duas camadas, uma com propriedades de superfície e outra com propriedade de armazenamento de água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIPCR-ASSOCIATION INTERNATIONALE PERMANENTE DES CONGRÈS DE LA ROUTE. **XIXe Congrès Mondial de la Route, Comité Technique des Caractéristiques de Surface** - Rapport, Marrakech, 1991.

AFNOR-NF-P-98-134: **Couches de Roulement: Béton Bitumineux Drainant**. Association Française de Normalisation, AFNOR, 1991.

AFNOR-NF-P-98-250-2: **Essais Relatifs aux Chaussées – Préparation des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 2: Compactage des Plaques**. Association Française de Normalisation, AFNOR, 1993.

AFNOR-NF-P-98-253-1: **Essais Relatifs aux Chaussées – Déformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés, Partie 1: Essai d’Orniérage**. Association Française de Normalisation, AFNOR, 1993.

AFNOR-NF-P-98-254-2: **Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés, partie 2**. Association Française de Normalisation, AFNOR, 1993.

ASPHALT ACADEMY. **Technical Guideline: The Use of Modified Bituminous Binders in Road Construction – TG 1**. Sabita e CSIR, Pretoria. South Africa. 2001.

ASSOCIAÇÃO DAS RODOVIAS DO JAPÃO. **Projeto Diretriz da Tecnologia da Pavimentação Drenante**. Publicação do Ministério dos Transportes do Japão. 1996. p. 111.

BELANGER, J.; DELALANDE, G.; STASSE, G. **Quelques Données sur l’Adhérence des Enrobés Drainants et sur son Optimization**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 883-908.

BILLMEYER, I. W. **Polymers and Polymerization**. 35. ed., Wiley-Interscience, EUA. 1984.

BOCHOVE, G. G. VAN; GORKEN, F. VON. **Two Layered Porous Asphalt – A New Concept Civil Technical Properties and Experience**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 249-269.

BOLZAN, P. E. (a) **High Performance Modified Open Porous Asphalt on the Ezeiza-Cañuelas Highway in Argentina**. In: RIO ASPHALT CONFERENCE HELD, 2000, Rio de Janeiro, Brazil 4-6 December. Brazilian Petroleum Institute – IBP. 2000.

BOLZAN, P. E. (b) **Mezclas Asfálticas para Carpeta de Rodamento Modificadas com la Adición de Fibras de Celulosa (40-60 mm de espesor)**. In: RIO ASPHALT CONFERENCE HELD, 2000, Rio de Janeiro, Brazil 4-6 December. Brazilian Petroleum Institute – IBP. 2000.

BOLZAN, P. E. (c) **Mezclas Fibro-Asfálticas Drenantes con Fibras**. In: RIO ASPHALT CONFERENCE HELD, 2000, Rio de Janeiro, Brazil 4-6 December. Brazilian Petroleum Institute – IBP. 2000.

BONNOT, J. **L'Expérience Française des Bétons Bitumineux Drainants**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 1145-1171.

BROSSEAUD, Y. **Techniques Disponibles pour L'Entretien des Enrobés Drainants**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, Madrid. 1997. p. 933-953.

CAMPOS, O. de S. **Análise do Comportamento de Trecho Piloto de Revestimento Poroso com Asfalto Modificado por Polímero**. 1998. 315 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia e Transportes, São Paulo, 1998.

CARDOSO, S. H.; MARCON, A. F.; APS, M.; MARCELLO, J. R. **Proposta para implantação de Centros de Análise e Controle de Acidentes (CACA) em Órgãos Rodoviários e Vias Urbanas**. In: 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2., 1995, Cuiabá, MT. 1995. p. 285-302.

CARDOSO, S. H. **Avaliação Estrutural e Funcional dos Pavimentos Asfálticos DER-SC**. In: PROGRAMA DE CAPACITAÇÃO TÉCNICA – EXERCÍCIO, 1997, Florianópolis. 1997.

CERATTI, J. A.; RUWER, P. M.; OLIVEIRA, J. A. **Estudo do Comportamento Mecânico de Concreto Asfáltico com Ligante Modificado por Polímero**. In: 13º ENCONTRO DE ASFALTO, - IBP Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Rio de Janeiro. 1996.

COBO, M. F. **Control y Características de los BMP para su Empleo en Mezclas Drenantes**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 483- 497.

CORTÉ, J. F. **Types, Concepts, et Dimensionnement des Enrobés Drainants**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 45-61.

ORUE-ECHEVARRIA, A. B. **Fabricación y Puesta en Obra**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 459-475.

CATÁLOGO VIATOP: **Informações Técnicas VIATOP**. J. Rettenmaier e Söhne GmbH + Co, Manufacturers of Fibres. 2003.

CHOQUET, F.; ISTA, E. **The determination of SBS, EVA and APP polymers in modified bitumens**. In: SYMPOSIUM ON POLYMER-MODIFIED ASPHALT BINDERS, ed. by K.R.Wardlaw and S.Shuler, San Antonio, Texas. 1990. p. 35-49.

COOLEY JR., L. A. **Permeability of Superpave Mixture Evaluation of field Permeameters**. Research Engineer, National Center for Asphalt Technology, Auburn University, Alabama, NCAT Report No. 99-1. 1999.

DECOENE, Y. **Contribution of Cellulose Fibers to the Performance of Porous Asphalts**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p. 82-86.

DI BENEDETTO, H.; JOUNI, M.; BOILLON, P.; SALHI, J. **Mesures in situ et en Laboratoire des Écoulements dans les Bétons Bitumineux Drainants – Modélisation et Validation**. In: BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES – 204, França. 1996.

DNER – **Manual de Reabilitação de Pavimentos Asfálticos**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DNER-ES 386/99: **Pavimentação – Pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DNER-ME 003/99: **Material betuminoso - determinação da penetração**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DNER-ME 004/94: **Material betuminoso - determinação da viscosidade Saybolt-Furol a alta temperatura (ABNT-MB 517)**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER-ME 035/98: **Agregados – determinação da abrasão “Los Angeles”**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DNER-ME 043/95: **Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1995.

DNER-ME 054/97: **Equivalente de areia**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1997.

DNER-ME 078/94: **Agregado graúdo – adesividade a ligante betuminoso**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER-ME 086/94: **Agregado – determinação do índice de forma**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER-ME 117/94: **Misturas betuminosas – determinação da densidade aparente**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER-ME 138/94: **Misturas Betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DNER-ME 194/98: **Agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1998.

DNER-ME 383/99: **Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cântabro**. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro, RJ. 1999.

DO, MINH-TAN. **Contact Pneu/Chaussées – Aport de la Microtexture**. In: BULLETIN DE LIAISON DES LABORATOIRES DE PONTS ET CHAUSSÉES, n. 196. França. 1995.

DOMINGUES, F. A. A. **Equipamento para a Medição da Aderência entre o Pneu e o Pavimento Desenvolvido pelo NDTT/USP**. In: 25ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1991, ABPV, São Paulo, SP. 1991.

EDWARDS, B. J. **Motorway speeds in wet weather: the comparative influence of porous and conventional asphalt surfacings.** Journal of Transport Geography 10. 2002. p. 303–311.

FAXINA, A. L. **Estudo em Laboratório do Desempenho de Concreto Asfáltico Usinado a Quente Empregando Ligante Tipo Asfalto Borracha.** 2002. 185 f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, São Paulo. 2002.

FERNANDES, E. S. **Influencia dos agregados rochosos na aderência pneu-pavimento.** 1998. 191 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de transportes. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

FERNANDES, E. S.; DOMINGUES, F. A. A. **Considerações sobre a Micro e a Macrotextura de Pavimentos.** In: 27ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 3. ed. São Paulo. 1993. p. 98-119.

FERREIRA, P. N. **Avaliação da macrotextura de trechos de pavimentados de rodovias estaduais situadas na região insular do Município de Florianópolis.** 2002. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2002.

FONSECA, P. **Misturas Betuminosas Drenantes – A Experiência Portuguesa.** In: III ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 1998, Minas Gerais. 1998.

GANGA, Y.; ARPINO, J.; FLEURY, M.; GOYON, N.; POIRER, J. C. **Les Nouvelles Générations d'Enrobés Drainants – Etat de la Technique.** In: CONGRESO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madri. 1997. p. 87-97.

GNCSC – Group National des Caractéristiques de Surface des Chaussées: **Note D'Information – Qualités d'Usage des Revêtements Routiers en Présence d'Eau,** SETRA, Bagneux, França. 1996.

HEYSTRAETEN, G. V.; MORAUX, C. **Ten Years' Experience of Porous Asphalt in Belgium.** Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p. 34-40.

HUBBER, G. A.; SHULLER, T. S. **Providing Sufficient Void Space for Asphalt Cement: Relationship of Mineral Aggregate Voids Gradation in Effects of Aggregates and Mineral Filler on Asphalt Mixture Performance,** Richard C. Meininger, editor, ASTM-STP 1147. 1992.

INFORMAÇÃO TÉCNICA EASTMAN: **Material Safety Data Sheet.** Copyright 2001 by Eastman Chemical Company. 2001.

INFORMAÇÃO TÉCNICA VIATOP: **Misturas asfálticas em laboratório usando VIATOP.** J. Rettenmaier e Söhne GmbH + Co, Manufacturers of Fibres. 2003a.

INFORMAÇÃO TÉCNICA VIATOP: **Schellenberg Binder Drainage Test.** J. Rettenmaier e Söhne GmbH + Co, Manufacturers of Fibres. 2003b.

ISENRING, T.; KÖSTER, H.; SCAZZIGA, I. **Experiences with Porous Asphalt in Switzerland**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p 41-53.

ISTA, E.; CHOQUET, F. **The determination of bitumen and recycled tire rubber content in rubberized asphalt road mixtures**. In: ASTM SYMPOSIUM ON POLYMER-MODIFIED ASPHALT BINDERS, 1990, ed. by K.R.Warlaw and S.Shuler, San Antonio, Texas. 1990. p. 224-234.

KAMIYA, K.; SHIMENO, S.; MINAKATA, T. **Status and Concerns on JH's Drainage Asphalt Pavement**, Japan Highway Public Corporation. 1998. p. 17.

KOKKALIS, A. G. **Prediction of Skid Resistance from texture measurements**. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport, n. 129, p. 85-93. 1998.

KRAEMER, C. **Retrospectiva y Actualidad de las Mezclas Drenantes**. In: CONGRESO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 25-33.

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. **Frech-Design Manual for Pavement Structures**. Paris. 1997.

LEFEBVRE, G. **Porous Asphalt**. PIARC Technical Committee on Flexible Roads, PIARC Technical Committee on Surface Characteristics, Permanent International Association of Road Congresses. Belgium. 1993.

LEITE, L. F. M. **Estudos de Preparo e Caracterização de Asfaltos Modificados por Polímero**. 1999. 266 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Macromoléculas Professora Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LEITE, L. F. M.; CONSTANTINO, R. S.; VIVONI, A. **Rheological Studies of Asphalt with Ground Tire Rubber**. In: PROCEEDINGS OF THE ASPHALT RUBBER 2000 CONFERENCE, Vilamoura, Portugal. 2000.

LEONETTI, F. B. **Concreto Asfáltico Drenante com Borracha de Pneu Via Úmida**. Relatório de Pesquisa PIBIC/CNPq, UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

LUCAS, J.; BEGOU, P. A. **Description de la Macrotecture et de la Microtexture**. In: BULLETIN DES LIAISON DES LABORATOIRES DE PONTS ET CHAUSSEES, n. 185, p. 63-70. 1993.

MALYSZ, R.; NÚÑEZ, W.P.; GEHLING, W. Y. Y.; CERATTI, J. A.; GOLDENFUM, J. A.; SILVEIRA, A. L. L. da; DAU, F.; ARROJO, A. **Pavimentos Permeáveis: Uma Alternativa para o Controle do Escoamento Superficial de Águas Pluviais em Vias Urbanas**. In: 12ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2003, Aracajú, SE. 2003.

MERIGHI, J. V. **Deformação Permanente em Misturas Asfálticas**. In: 32ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2., 2000, Cuiabá, MT. 2000. p. 304-316.

MERIGHI, J. V.; BERNUCCI, L. B.; SUZUKI, C. Y. **Utilização de Simulador de Tráfego para Análise de Comportamento de Misturas Asfálticas**. In: 29ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 2., 1995, Cuiabá, MT. 1995. p. 304-316.

MEURER FILHO, E. **Estudos de Granulometrias para Concreto Asfálticos Drenantes**. 2001. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MICHAUT, J. P. **Enrobé Drainant à Teneur en Vide Élevé: Premier Bilan**. In: CONGRESO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997. Madri. 1997. p. 133-147.

MOMM, L. **Estudo dos Efeitos da Granulometria sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e seu Comportamento Mecânico**. 1998. 259 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 1998.

MOMM, L. **Granulometria para o Concreto Asfáltico Drenante**. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 1., v. II, 2000, Centro Rodoviário Português, Lisboa. 2000. p. 583-592.

MOMM, L. **Pavimento Drenante: Qualidade da superfície do pavimento Rodoviário**, relatório de pesquisa. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2001.

MOMM, L. **Pavimento drenante em concreto asfáltico**. In: 7º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, 2002, Vitória, ES. 2002. p. 27.

MOMM, L.; MEURER FILHO, E. **Study of the Aggregate for the Pervious Asphalt Concrete**. In: SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MAINTENANCE AND REHABILITATION OF PAVEMENTS AND TECHNOLOGICAL CONTROL, 2001, Alabama, USA. 2001.

MORAUX, C. **Development and Experiences with Porous Asphalt in Belgium**. “New conceptions for European Road Construction Experiences and Latest Developments with Modified Asphalt Binders”. Kuala Lumpur. 1989.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOUNCE, J. M.; BARTOSKEWITZ, R. T. **Hydroplaning and Roadway Tort Liability**, Transportation Research Record, nº1401, USA. 1993. p. 117-124.

NBR 6560: **Material Betuminoso – Determinação do Ponto de Amolecimento – Método do Anel e Bola**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. 1985.

NBR 7175: **Cal Hidratada para Argamassas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

NICHOLLS, J. C. **Review of UK porous asphalt trials**. TRL Report TRL264/HW. Crowthorne: TRL. 1997.

OLIVEIRA, C. G. M.; FARIAS, M. M. de.; CARVALHO, J. C. de; FALCÃO, P. R. F. **Análise Laboratorial de Concretos Asfálticos Drenantes com Uso de Agregados Calcários**. In: 12ª REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 2003, Aracajú, SE. 2003.

PÉREZ-JIMÉNEZ, F. E.; GORDILLO, J. **Optimization of Porous Mixes Through the Use of Special Binders**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p. 59-68.

PÉREZ-JIMÉNEZ, F. E.; MIRO, R. **Análisis de la Repetibilidad del Ensayo Cántabro**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 405-419.

PONCINO, H. **Adherencia neumático-pavimento – Conceptos generales – Estado del conocimiento**. Boletín de la Comisión Permanente del Asfalto, Buenos Aires, n. 94. Argentina. 2001.

PORTO, H. G. **Pavimentos Drenantes**. São Paulo: D e Z Computação Gráfica e Editora. 1999. 105 p.

RAZ, R. T. **Conservación de la Permeabilidad en las Mezclas Porosas**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 661-677.

REIS, R. M. M. **Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado**. 2002. 165 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

REIS, R. M. M.; SANTO, R. N. E. **Asfalto Modificado com Polímero – Tecnologia de Ponta para Prolongar a Vida dos Pavimentos Asfálticos**. Publicação Técnica, Ipiranga Asfaltos S.A., São Paulo, p. 71. 1999.

ROCO, V.; FUENTES, C.; VALVERDE, S. **Evaluacion de la Resistencia al deslizamento en Pavimentos Chilenos**. In: 6º CONGRESSO INTERNACIONAL PROVIA, Termas de Chillán, Chile, p. 9. 2002

ROE, P. G.; WEBSTER, D. C.; WEST, G. **The Relation Between the Surface Texture of Roads and Accidents**. TRRL, Research Report 296, Washington, DC. 1990.

ROJAS, G. M.; RODRIGO, C. R.; CALDERÓN, R. Z. **Las Mezclas Drenantes en Chile**. In: 10º CONGRESO IBERO-AMERICANO DEL ASFALTO, 1999, Sevilla, Espanha. 1999.

RUBIO, B.; COLÁS, M. DEL M. **Mezclas Drenantes a Frío**. In: CONGRESO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 177-195.

RUIZ, A. **Caracterización en Laboratorio**. In: CONGRESO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 285-307.

RUIZ, A.; ALBEROLA, R.; PÉREZ, F.; SÁNCHEZ, B. **Porous Asphalt Mixtures in Spain**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p. 87-94.

RUSHMOOR BOROUGH COUNCIL: **Porous Asphalt**. Highway Improvements Report. File ref: hig9750. 1998.

SAINTON, A. **Advantages of Asphalt Rubber Binder for Porous Asphalt Concrete**. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC. 1990. p. 69-81.

SALINI, R. B. **Utilização de Borracha Reciclada de Pneu em Misturas Asfálticas**. 2000. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SERFASS, J. P.; BENISE, P. **Enrobés Drainants au Bitume-Elastomère. Formulation, Bruit et Adhérence**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 1243-1252.

SILLER, A. G. **Factores a Tener en Cuenta en el Estudio de Mezclas Drenantes**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 351-363.

SOTO, J. A. **Estudio en Laboratorio de Mezclas Drenantes**. In: CONGRESSO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid, 1997. p. 425-439.

SOUZA, F. S. V.; NEVES, M. A.; BARROS, R. M. V. **Avaliação da Resistência à Derrapagem nas Rodovias do Estado do Espírito Santo**. In: 28ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1994, ABPV, Belo Horizonte, MG. 1994.

SOUZA, F. S. V.; NEVES, M. A.; LIMA e SILVA, P.; BARROS, R. M. V. **Avaliação da Resistência à Derrapagem em Pavimentos Rodoviários**. In: 27ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 1993, ABPV, Teresina, PI. 1993.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. **Asfalto Borracha e Borracha Agregado: Possibilidades de Utilização de Borracha Reciclada em Misturas Asfálticas**. Revista Estradas do DAER, Porto Alegre, n. 4, p. 18-26, 2003.

SWART, J. H. **Experience with Porous Asphalt in the Netherlands**. In: CONGRESO EUROPEO DE MEZCLAS DRENANTES, 1997, Madrid. 1997. p. 1019-1035.

WOODSIDE, A. R., WOODWARD, W. D. H., ANDERSON, G. A. L. **Noise Measurement of Porous Asphalt**. In: Congresso Europeo de Mezclas Drenantes, 1997, Madrid. 1997. p. 821-843.

WYNGAARD, W. A. **Design Method for Bitumen Rubber Single Stone Seals**. In: PROCEEDINGS OF THE ASPHALT RUBBER 2003 CONFERENCE, 2003, Brasília, DF. 2003.